“Año de las cumbres en el Perú”



Tema: Teoría del caos: Efecto Mariposa.

Curso: Métodos y Técnicas de Estudio.

Docente:

Universidad: Ada A. Byron.

Facultad: Ingeniería de Sistemas.

Ciclo: 1.

Integrantes:

- ✓ Sobrino Mejía, Pablo.
- ✓ Gutiérrez Roncero, Carlos.
- ✓ Luyo Aguilar, Saida.
- ✓ Magallanes Martínez, Roberto.
- ✓ Lévano Yataco, Víctor.

Dedicado a la memoria de Edward Norton Lorenz, padre del efecto mariposa, su legado nos ha dejado una nueva formar de comprender las cosas.

Índice

Introducción

La presente investigación estás basada en la teoría del caos y el efecto mariposa, ambas las cuales tienen que ver en nuestra carrera profesional, pues esta trata de describir los comportamientos impredecibles en los diferentes tipos de sistemas.

Una característica principal de ambas es también que no solo se basa a una rama científica, sino que afecta a las diferentes ciencias y materias, pudiendo ser usada para comprender y analizar, como se dan paso a eventos tan grandes afectados solo por causas pequeñas y mínimas.

El interés de esta investigación, nace de la profunda curiosidad de conocer un tema nuevo y poco común de los generalmente tratados, a la vez para tener una verdadera apreciación al tema, ya que la introducción al nombre da a pensar en algo tan trivial y fuera de contexto que no se puede relacionar directamente con la idea o fundamentos generales de ambas.

El tema de proponer un tema tan poco usual, fue por puro interés académico, de poder asimilar un reto en cuanto a la elaboración de un trabajo bien detallado y completo que pueda ser comprendido por nuestros compañeros de estudios.

En el ámbito profesional, como estudiantes de la carrera de Ingeniería de Sistemas, versó en conocer más sobre como los diferentes sistemas pueden ser afectados de manera inusuales e inesperadas, pudiendo generar fallas enormes, si es que no se analizan en su mayoría las situaciones que pueden dar paso a los eventos, a la vez nos sirve para comprender y conocer más sobre los diferentes puntos estabilidad que se pueden encontrar en los diferentes tipos de sistemas que estudiaremos y con los que trabajaremos más adelante.

Capítulo I

I. Teoría del caos

1.1. Historia de la teoría del caos .

En el presente ensayo sobre la "Teoría del Caos" se realiza un análisis partiendo de las diferencias surgidas entre la Ciencia del siglo XIX y XX, es decir, la posición determinista y la "Nueva Física". Hasta principios del siglo XX, la Física se sitúa en la certeza de la predicción de los fenómenos, a pesar de los antecedentes de Poincaré en el siglo XIX sobre el problema de los tres cuerpos, donde se expresa que sólo podemos tener una "aproximación" y que la predicción se vuelve imposible. Sin embargo, se ignora tal postura y se continúa en la misma línea hasta el fin de la "Revolución de la Física"; es entonces que se retoman las consecuencias del descubrimiento de Poincaré y se observa que las variables pueden desarrollar un comportamiento caótico, complicado e impredecible pero dentro de un orden geométrico observable. Es así que, a partir de este enfoque, se desarrolla la "Teoría de Caos" , aportando un paradigma donde los problemas científicos pueden resolverse desde esta nueva óptica.

Desde hace algunos años oímos mencionar vagamente una "Teoría" a la que se dio por llamar "del Caos". No obstante, pocas de las referencias han sido claras. Para comprender el significado de la Teoría del Caos es conveniente analizar las diferencias entre la Ciencia del siglo XIX y la del XX.

Durante el siglo XIX, la Ciencia llegó a un triunfalismo determinista. Se creía que la Física, la más rigurosa e importante de las Ciencias, estaba a punto de cerrarse, ya que casi estaba todo concluido. Las leyes se expresaban en la Física de manera estrictamente determinista. Aunque ninguna otra Ciencia (excluiremos a las Matemáticas por ser otra su naturaleza y metodología) podía jactarse de lo mismo, se suponía que como la Física expresaba las leyes fundamentales del Universo, éstas eran igualmente aplicables en Química, Biología, Psicología, etc. sólo que en éstas, los temas de estudio se presentaban con mayor complejidad (una bacteria es mucho más compleja que el Sol mismo).

Pierre Simón de Laplace, el gran matemático, ya desde el siglo XVIII había expresado la idea dominante: "El estado presente del sistema de la Naturaleza es evidentemente una consecuencia de lo que fue en el momento precedente, y si concebimos una inteligencia tal que a un instante dado conociera todas las fuerzas que animan la Naturaleza y las posiciones de los seres que las forman, podría condensar en una única fórmula el movimiento de los objetos más grandes del Universo y de los átomos más ligeros: **nada** sería incierto para dicho ser, y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos". Ese era el anhelo de la Ciencia: ser capaz de predecirlo todo.

Pero en la misma Física, hacia finales del siglo XIX, aparecieron unos problemas que no parecían encontrar solución dentro del marco científico existente: eran llamados "el problema del éter" y la "catástrofe ultravioleta". Estos problemas llevaron a la Física a una revolución que desembocó en la Teoría de la Relatividad por un lado, y la Mecánica Cuántica, por el otro. Ambas teorías parecen desafiar el sentido común al proponer que el tiempo es relativo o que existen partículas virtuales llenando el Universo. La Mecánica Cuántica, en particular, postuló un principio devastador para la fe del científico en la posibilidad de hacer predicciones de todo; en pocas palabras, el Principio de Incertidumbre de Heisenberg afirma que nunca es posible tener mediciones exactas: sólo se podrán hacer aproximaciones. Nunca podremos conocer con exactitud la magnitud de lo ancho de esta hoja, sólo podremos decir, realmente que está entre 21.55 y 21.65, por ejemplo.

Muchos científicos se resistían a aceptar este principio, entre ellos Albert Einstein, quien trató de demostrar su inconsistencia, pero lo único que logró fue fortalecerlo aún más.

Los físicos se hallaban extremadamente atareados en desarrollar estas nuevas ideas. Algunos químicos se interesaban por el efecto de la Mecánica Cuántica en su disciplina. Los demás científicos, en tanto, se encontraban ocupados en sus propias disciplinas, menos maduras. Ninguno de ellos veían efectos importantes de las nuevas teorías de la Física sobre sus áreas. En efecto, la Teoría de la

Relatividad se aplica a lo muy grande (del tamaño del Sol o mayor) o lo muy veloz (a velocidades cercanas a las de la luz); mientras que la Mecánica Cuántica se ocupa de lo muy pequeño (de tamaño menor que el átomo).

Mientras esto ocurría, pocos reparaban en un tercer problema insoluble de la Física que traería consecuencias insospechadas en el examen científico de los fenómenos cotidianos: el problema de los tres cuerpos.

El problema de los tres cuerpos era más que nada astronómico: si se tienen dos cuerpos en el espacio, es fácil deducir las ecuaciones del movimiento: se moverán en elipses, por ejemplo. Pero si se tienen tres cuerpos, ya no hay manera de encontrar tales ecuaciones exactas, solamente aproximaciones válidas para un intervalo. Al salir de ese intervalo de validez, se debe hacer otras aproximaciones.

Henri Poincaré decidió atacar el problema de los tres cuerpos a finales del siglo XIX, con motivo de un concurso de Matemáticas organizado en Suecia. Al estudiarlo, encontró algo que le sorprendió: un sistema tan sencillo de plantear como el de los tres cuerpos podría dar un comportamiento extremadamente complicado, tanto que imposibilitaba hacer predicciones a largo plazo en el mismo.

Poincaré mismo lo expresa de esta manera: "Una pequeña causa que nos pasa desapercibida determina un considerable efecto que es imposible de ignorar, y entonces decimos que el efecto es debido al azar. Si conocemos exactamente las leyes de la Naturaleza y la situación del Universo en el momento inicial, podemos predecir exactamente la situación de este mismo Universo en un momento posterior. Pero aun si fuera el caso que las leyes de la Naturaleza no nos guardasen ningún secreto, todavía nosotros conoceríamos la situación inicial sólo **aproximadamente**. Si esto nos permitiera predecir la situación posterior con la **misma aproximación**, que es todo lo que necesitamos, podríamos afirmar que el fenómeno ha sido predicho, que es gobernado por leyes conocidas. Pero esto no es siempre así; puede pasar que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan grandes diferencias en el fenómeno final. Un pequeño error al principio

produce un error enorme al final. La predicción se vuelve imposible, y tenemos un fenómeno fortuito".

Los físicos y demás científicos hicieron poco caso de este descubrimiento matemático (de hecho sólo los matemáticos continuaron trabajando en ello). Hasta el último cuarto del siglo XX donde, una vez apaciguada la llama de la Revolución de la Física, se observaron las consecuencias del descubrimiento de Poincaré. Y sobre todo por la ayuda de los ordenadores.

Se pretendía hacer predicciones a medio plazo del clima apoyándose en cálculo computacional intensivo. Pero se vio que era imposible porque simplemente tres variables podían desarrollar un comportamiento "caótico", es decir, muy complicado e impredecible (cambios no periódicos y crecimiento del efecto de las pequeñas diferencias en el inicio). Sin embargo, este caos es distinto del comportamiento al azar. Existe un orden dentro del caos que puede observarse geométricamente.

Imaginemos una curva en el espacio. La curva nunca se cruza, pero es infinita. Se construyó con unas determinadas condiciones iniciales (es decir, a partir de un punto determinado en el espacio). Si hubiésemos iniciado desde otro punto, por muy cercano que estuviera al punto original, la trayectoria hubiera sido distinta en el sentido de que si en la primera dio 4 vueltas alrededor del un lóbulo antes de pasarse al otro, en la segunda trayectoria daría, digamos 17 vueltas antes de pasar al otro lóbulo. Pero ¡las dos trayectorias, en conjunto se verían como la curva imaginada. Siempre la misma figura. Ninguna trayectoria puede alejarse de los lóbulos ni entrar dentro de ellos, no son trayectorias al azar, aunque no sean predictibles.

¿Qué importancia tenía para las Ciencias?

Si tres variables generan un comportamiento complicado, no aleatorio, ¿qué no harán más variables? Aquí acaba la posibilidad de predicción a largo plazo de la Ciencia. Sin embargo, visto al revés, un comportamiento complejo, en lugar de ser

causado por un enorme número de variables, la mayoría indeterminadas, ¿no será en realidad manejado por un puñado de variables en comportamiento caótico?

La teoría del Caos aporta un nuevo enfoque a la complejidad que es la característica común en la inmensa mayoría de los problemas de la Ciencia: reacciones químicas en el suelo, el comportamiento humano... todo eso rebosa complejidad. Y el caos no es desorden simplemente, sino un orden diferente, que debe verse de otro modo. Más aún, muchas variables no necesariamente han de generar un comportamiento tan complicado que parezca al azar. Muchas veces, de sus interacciones emerge un orden diferente. Por ejemplo, de la interacción de muchos seres humanos puede surgir una sociedad, que contiene un orden evidente. No es predecible a largo plazo, pero el orden existe, como en el atractor de Lorentz.

Así, la teoría del Caos puede aplicarse a toda Ciencia, pero hay que entender el enfoque nuevo que aporta, una especie de paradigma que no descarta ni el desorden aparente ni lo que parece ser "ruido de fondo" de un comportamiento lineal perfecto. Muchos problemas científicos podrían resolverse con una nueva óptica.

El **caos** es impredecible, pero determinable. O dicho de otro modo, el **caos** no es aleatorio, tiene un orden subyacente. En un principio, la **teoría** del **caos** se aplicaba al análisis de circuitos electrónicos, encontrando resultados tales como el aumento de la potencia de láseres (Ditto y Pecora) y la sincronización de circuitos. Se demostró entonces, que era posible sincronizar dos sistemas caóticos, siempre y cuando fuesen excitados por la misma señal, independientemente del estado inicial de cada sistema (Neff y Carroll). O sea, que al perturbar adecuadamente un sistema caótico, se le está forzando a tomar uno de los muchos comportamientos posibles. Lo que ocurre es que el **caos** es sensible a las condiciones iniciales. Sin sincronismo, dos sistemas caóticos virtualmente idénticos, evolucionarán hacia estados finales distintos.

Más tarde, pudo aplicarse al análisis de oscilaciones en reacciones químicas, y al seguimiento del latido cardíaco. En los últimos años, la Biología se hace cargo de

este nuevo tipo de procesos, modelizando comportamientos enzimáticos (Hess y Markus). Los sistemas naturales son, en su gran mayoría, no lineales, y justamente el **caos** es un comportamiento no lineal.

Un ejemplo introductorio: entendemos perfectamente lo que significa que alguien afirme que pesa 80.5 Kg. También es razonable que aceptemos que un boxeador pesa 75,125 Kg (sabemos que este peso sólo es válido en el momento del pesaje). Pero ¿ que opinaríamos de una persona que afirmara pesar 78,12456897355568793 Kg?. No parece razonable. Con cada exhalación eliminamos vapor de agua y dióxido de carbono en cantidades mayores a 0,0000001 Kg, con lo cual dejamos sin valor las últimas 10 cifras del peso mencionado. Y en este punto es donde empiezan algunos conceptos fundamentales.

Observación Fundamental: si empleamos un peso de 80,5 Kg en nuestras cuentas, en realidad, matemáticamente estamos empleando el número 80,5000000000000000000000000...... y ahí es donde conviene comenzar a replantearse el empleo de las Matemáticas para describir la realidad física. Porque si no especificamos 100, 200 o un millón de cifras significativas, y hacemos cuentas con números redondos, en realidad estamos empleando ceros para completar las cifras significativas que no conocemos.

Por supuesto que toda persona que trabaja con datos experimentales sabe que no puede obtener resultados con mayor cantidad de cifras significativas que las que le permiten sus mediciones experimentales. Pero la pregunta vuelve a ser la misma: aunque no dispongamos de 100 cifras significativas (y en ninguna medición real se superan las 10 cifras significativas), ¿éstas cifras existen?.

Para ser más específico: si dos cuerpos chocan entre sí, aunque no podamos medir su masa con mayor exactitud que 6 cifras significativas, ¿podemos afirmar que las leyes que rigen la colisión responden a valores de masa expresados con 50 cifras significativas? (o con un millón de cifras)? ¿O para la Naturaleza existe un grado máximo de exactitud, a partir del cual la respuesta es indeterminada?.

De modo que ahora se puede formular la PREGUNTA (para la que no se tiene respuesta):

¿Con cuántas cifras significativas trabaja la Naturaleza? ¿Tiene sentido la pregunta anterior?

Todo esto no pasaría de ser un juego intelectual si no hubiera aparecido en escena la T**eoría** del **Caos**. Porque después de todo: ¿qué nos importan las cifras significativas que no podemos medir ni en los datos ni en los resultados experimentales?. Pero resulta que la T**eoría** del **Caos** puso de manifiesto que existen numerosos sistemas reales donde la respuesta a un estímulo varía en forma manifiesta con cambios minúsculos en las condiciones iniciales.

El primer experimentador del **caos** fue un meteorólogo llamado Edward Lorentz. En 1960 estaba trabajando en el problema de predecir el tiempo. Tenía un ordenador que calculaba el tiempo con 12 ecuaciones. La máquina no predijo el tiempo, pero en principio predijo cómo sería el tiempo probablemente. Un día, en 1961, Lorentz quiso ver unos datos de nuevo. Introdujo los números de nuevo en el ordenador, pero para ahorrar con el papel y el tiempo, solo calculó con 3 números decimales en vez de 6. Le salieron resultados totalmente diferentes. Lorentz intentó encontrar una explicación. Así surgió la T**eoría** que está tan de moda en nuestros días: la T**eoría** del C**aos**.

Según las ideas convencionales, los resultados habrían tenido que ser prácticamente los mismos. Lorentz ejecutó el mismo programa, y los datos de inicio casi fueron iguales (" esas diferencias muy pequeñas no pueden tener efecto verdadero en los resultados finales"). Lorentz demostró que esa idea era falsa. Al efecto que tienen las diferencias pequeñas e iniciales, después se le dió el nombre del 'efecto mariposa': "El movimiento de una simple ala de mariposa hoy, produce un diminuto cambio en el estado de la atmósfera. Después de un cierto período de tiempo, el comportamiento de la atmósfera diverge del que debería haber tenido. Así que, en un período de un mes, un tornado que habría devastado la costa de Indonesia no se forma. O quizás, uno que no se iba a formar, se forma."

Este fenómeno, y toda la T**eoría** del C**aos** es también conocido como dependencia sensitiva de las condiciones iniciales. Un cambio pequeño puede cambiar drásticamente el comportamiento a largas distancias de un sistema. Al medir, una diferencia tan pequeña puede ser considerada 'ruido experimental' o impuntualidad del equipo. Esas cosas son imposibles de evitar, incluso en el laboratorio más moderno. Con un número inicial 1,001 el resultado puede ser totalmente diferente que con 1,000543.

Es simplemente imposible alcanzar este nivel de eficacia al medir. De esta idea, Lorentz concluyó que era imposible predecir exactamente el tiempo. Pero esto llevó a Lorentz a otros aspectos de lo que viene llamándose T**eoría** del C**aos**. Lorentz intentó encontrar un sistema menos complejo que dependiera sensitivamente de las condiciones iniciales. Estudió las ecuaciones de convección y los simplificó. El sistema ya no tuvo que ver con la convección, pero sí dependía mucho de los datos iniciales, y esta vez solo había 3 ecuaciones. Después se vió que sus ecuaciones describen precisamente una "rueda de agua".

En 1963 Lorenzo publicó lo que había descubierto, pero como lo publicó en un periódico meteorológico, nadie le lo tomó en consideración. Su descubrimiento solo fue reconocido más tarde, cuando fueron redescubiertos por otros científicos. Lorentz descubrió algo revolucionario, pero tuvo que esperar a alguien que le descubriera a él.

Así surgió la nueva Ciencia que todavía en nuestros día también es muy joven. Hay muchas ideas falsas sobre el **caos**, según las cuales la T**eoría** del C**aos** es un tratado del desorden. Nada más lejos de la verdad. Es cierto que la T**eoría** dice que cambios pequeños pueden causar cambios enormes, pero no dice que no hay orden absolutamente. Una de las ideas más principales es que mientras es casi imposible predecir exactamente el estado futuro de un sistema, es posible, y aún más, muchas veces fácil, modelar el comportamiento general del sistema. Eso es lo que se muestra en el "Atractor" de Lorentz. O sea, el C**aos** no se trata del desorden, incluso en cierto sentido podemos decir que es determinista.

"La rueda de agua" de Lorentz, antes mencionada, es parecida a la rueda en el parque de atracciones. Tiene cajitas (generalmente más de siete), que están colgadas a la rueda, o sea, su 'boca' siempre mira para arriba. Abajo todas tienen un hueco pequeño. Y todo eso está dispuesto bajo un flujo de agua. Si le echamos agua a velocidad pequeña, el agua después de entrar en el cajón, sale inmediatamente por el hueco. Así que no pasa nada. Si aumentamos la corriente del agua un poco, la rueda empieza a rotar, porque el agua entra más rápido a las cajitas que sale. Así, las cajas pesadas por el agua descienden dejando el agua, y cuando están vacías y ligeras, ascienden para ser llenadas de nuevo. El sistema está en un estado fijo, y va a continuar rotando a una velocidad prácticamente constante. Pero si aumentamos la corriente más, van a pasar cosas extrañas. La rueda va a seguir rotando en la misma dirección, pero su velocidad va a decrecer, se para y luego gira en la dirección contraria. Las condiciones de las cajitas ya no están suficientemente sincronizadas como para facilitar solamente una rotación simple, el **caos** ha conseguido el mando en este sistema aparentemente tan sencillo. Ahora no podemos decir nada del estado de la rueda en concreto, porque el movimiento nos parece hecho totalamente al azar.

Los sistemas caóticos están presentes todos los días. Y en vez de mirarlos cada uno, investigamos los comportamientos de los sistemas parecidos. Por ejemplo, si cambiamos un poco los números iniciales del atractor, siempre nos dará números distintos que en el caso anterior, y la diferencia con el tiempo va a ser cada vez más grande, de tal forma que después de un tiempo, los dos casos aparentemente ya no tendrán que ver, pero sus gráficas serán iguales.

¿Y por qué no se desarrolló esta Ciencia hasta ahora?

El 'padre' del conjunto Mandelbrot fue un libro publicado por Gastón Maurice Julia, y aunque recibió el 'Grand Prix de'l Academie des Sciences', sin visualizar sus funciones nadie le dio mucha importancia. La respuesta es simple: ordenadores. Para poner un conjunto Mandelbrot en la pantalla se necesitan 6 millones de cálculos (operaciones), que son mucho para ser calculados por científicos, pero para los ordenadores actuales es una tarea de todos los días. Y de verdad, la T**eoría** surgió cuando los matemáticos empezaron a introducir números

al ordenador y miraron lo que éste hacía con ellos. Después trataron de visualizarlo todo de alguna forma.

Pasado un tiempo, las imágenes se veían como la naturaleza. Nubes, montañas y bacterias. Así indicaron por qué no podemos predecir el tiempo. Parecían ser iguales al comportamiento de la bolsa y de las reacciones químicas a la vez. Sus investigaciones dieron respuestas a preguntas puestas hace 100 años sobre el flujo de fluidos, cómo pasaban de un flujo suave hacia un flujo caótico, o sobre el comportamiento del corazón, o las formaciones de rocas. Los sistemas caóticos no son hechos al azar, y se conocen por unos rasgos muy simples.

Los sistemas caóticos son deterministas, o sea hay algo que determina su comportamiento.

Los sistemas caóticos son muy sensitivos a las condiciones iniciales. Un cambio muy pequeño en los datos de inicio producen resultados totalmente diferentes.

Los sistemas caóticos parecen desordenados, o hechos al azar. Pero no lo son. Hay reglas que determinan su comportamiento. Sistemas de verdad hechos al azar no son caóticos. Los sistemas regulares, descritos por la Física clásica, son las excepciones. En este mundo de orden, reglas caóticas...

Las nuevas investigaciones muestran que sí hay esperanzas de 'domesticar' el **caos**. Edward Ott, Ceslo Grebogi (físicos) y James A. Yorke (matemático) elaboraron un algoritmo matemático con el que un **caos** puede ser transformado en procesos periódicos sencillos. Y ya superaron experimentos, de los que probablemente el más importante es el experimento de A. Garfinkel de la Universidad de California. Logró transformar el movimiento caótico de un corazón sacado de un conejo en un movimiento regular. Obviamente el uso de esto en la medicina significaría un avance enorme.

La idea nueva es que no hace falta comprenderlo todo sobre el movimiento caótico para regularlo. El algoritmo Ott-Grebogi-Yorke mira continuamente a qué 'dirección' tiende el proceso, y variarlo con perturbaciones pequeñas para lograr

que esté de nuevo en el 'camino' antes deseado. Naturalmente aquí no se termina de vigilar el sistema, porque después el **caos** aparecerá de nuevo. Yorke dice que el método es como "ayudar a andar a un elefante con un palito".

Parece que habrá más avances en el regulamiento del **caos**, lo cual nos daría respuesta a muchas preguntas, nos ayudaría evitar catástrofes, y daría un avance enorme a toda la Ciencia, todo el saber logrado hasta ahora.

Los sistemas caóticos son muy flexibles. Si tiramos una piedra al río, su choque con las partículas del agua no cambia el cauce del río, sino que el **caos** se adapta al cambio. Sin embargo, si el río hubiese sido creado por nosotros con un orden artificial, donde cada partícula de agua tuviera una trayectoria determinada, el orden se hubiera derrumbado completamente. El **caos** en realidad es mucho más perfecto que nuestro orden artificial; hemos de comprender el **caos** y no intentar crear un orden rígido, que no sea flexible ni abierto a la interacción con el medio.

Siempre hemos estado obsesionados por el control, creemos que cuantas más técnicas creemos, más control tendremos sobre el mundo. Pero con cada tecnología nueva que introducimos se nos echan encima muchos problemas, para cada uno de los cuales hemos de inventar nuevas tecnologías. Volvamos al ejemplo del río: si tiramos una piedra el cauce no cambia, pero si tiramos una roca gigante la flexibilidad del sistema caótico no será suficiente. Es lo que ocurre en la Tierra: es un sistema caótico, siempre cambiante y adaptándose, pero si nos pasamos de la raya el sistema se puede romper. De echo lo está haciendo y por eso tenemos problemas con la capa de ozono, el aumento de la temperatura global y el deshielo, problemas con los recursos como el petróleo, etc.

Aprender a vivir en el **caos** no significaría aprender a controlarlo, ni a predecirlo. Al contrario: hemos de enfocar la cuestión desde el punto de vista de que nosotros también somos parte del **caos**, no nos podemos considerar como elementos aparte. Desde esa perspectiva lo que podemos hacer es vivir de la creatividad del **caos**, sin intentar imponernos: si conseguimos realmente formar parte del sistema, el concepto de sujeto y objeto desaparecerán, con lo cual el problema del control también.

Veamos unos ejemplos donde se ve claramente que la Tierra es una unidad caótica: un bosque, por citar algo, puede llegar a ser muy flexible y adaptable debido a su rica red de rizos retroalimentadores que interactúan con el medio constantemente. Algunos bosques, incluso, se han ajustado a cambios drásticos. Pero cuando este sistema caótico se desestabiliza (porque empezamos a talar bosques, por ejemplo), la conducta no lineal puede hacer que su dinámica cambie abruptamente o que incluso se colapse. Ya tenemos el ejemplo de tierras sobre las que hace años hubo ricos bosques que creaban su propio microclima y ellos mismos hacían que las condiciones les fueran favorables; sin embargo, ahora no se puede plantar ni una sola planta ahí. Cortar un árbol puede significar que el bosque se quede con un árbol menos. Cortar diez árboles también. Pero cortar mil árboles puede no significar que el bosque se quede con mil menos, sino que a partir de ahí se extingan todos. Los procesos naturales de la Tierra son indivisibles y constituyen un holismo capaz de mantenerse y alimentarse, al menos que en el sistema caótico intervenga algún factor que lo desestabilice.

En la atmósfera de nuestro planeta hay considerables cantidades de metano. Por lógica, todo el metano y el oxígeno libres deberían haber entrado en una reacción de combustión. Como Lovelock remarcó, metano, oxígeno, sulfuro, amoníaco y cloruro de metilo están en la atmósfera en diferentes niveles de concentración de lo que podríamos esperar que ocurriera en una probeta. Lo mismo ocurre con el porcentaje de sal del mar. Estas concentraciones aparentemente extrañas resultan ser las óptimas para la supervivencia de la vida sobre la Tierra, es decir, la Tierra se comporta como un ser vivo, con los bosques, los océanos y la atmósfera como sus órganos.

Cuando un automóvil (fruto de la visión mecanicista) se avería, buscamos la parte averiada. Es una parte la que hace que todo el coche deje de comportarse como una unidad (porque por mucho que metamos la llave no arranca). Pero en los sistemas caóticos, como son las familias, las sociedades o los sistemas ecológicos, el problema se desarrolla siempre a partir de todo el sistema, nunca a partir de una "parte" defectuosa. Siempre es necesario tener en cuenta todo el contexto en el que se manifiesta un problema.

El cuerpo humano también es un sistema caótico. Está claro que es imposible predecir el recorrido que una partícula cualquiera tendrá dentro de nuestro cuerpo. También está claro que la medicina todavía no puede hacer una predicción acerca de la evolución del cuerpo de determinado individuo. Sin embargo, el cuerpo humano, a pesar de las muy diferentes condiciones externas a que puede estar expuesto (clima, alimento, esfuerzo físico, etc), siempre mantiene una forma general. Es tan resistente a cambios (dentro de lo que cabe) porque los sistemas caóticos son muy flexibles. Una enfermedad es algo impredecible, pero si el cuerpo no tuviera la libertad de ponerse enfermo, con cualquier cambio producido el sistema se desmoronaría.

Hasta tal punto es flexible dicho sistema, que mantiene una forma más o menos parecida durante más de 70 años, a pesar de que ningún átomo de los que hoy forman nuestro cuerpo era el mismo hace 7 años. La explicación de que un sistema tan impredecible como el cuerpo humano sea tan estable está en que es un atractor extraño y está lleno de atractores extraños. El sistema siempre es atraído hacia un determinado modelo de conducta; si cambiamos algo en el sistema éste vuelve cuanto antes hacia el atractor extraño. Esto no significa que la conducta sea mecánica, todo lo contrario: es impredecible. Sólo sabemos hacia dónde va a tender. Por ejemplo, en el corazón la conducta atractora es el disparo de una secuencia de neuronas. Conocemos aproximadamente el ritmo que debería tener el corazón, pero éste siempre tiene pequeñas irregularidades. Estas pequeñas alteraciones son una señal de salud del corazón, una muestra del vigor del sistema caótico, que es flexible a los cambios. El **caos** permite al corazón un abanico de comportamientos (grados de libertad) que le permiten volver a su ritmo normal después de un cambio.

1.2Teoria del caos.

Tiene la denominación popular de la rama de las matemáticas y la física que trata ciertos tipos de comportamientos impredecibles de los sistemas dinámicos. Los sistemas dinámicos se pueden clasificar básicamente en:

- Estables
- Inestables
- Caóticos

Un sistema estable tiende a lo largo del tiempo a un punto, u órbita, según su dimensión (atractor). Un sistema inestable se escapa de los atractores. Y un sistema caótico manifiesta los dos comportamientos. Por un lado, existe un atractor por el que el sistema se ve atraído, pero a la vez, hay "fuerzas" que lo alejan de éste. De esa manera, el sistema permanece confinado en una zona de su espacio de estados, pero sin tender a un atractor fijo.

Una de las mayores características de un sistema inestable es que tiene una gran dependencia de las condiciones iniciales. De un sistema del que se conocen sus ecuaciones características, y con unas condiciones iniciales fijas, se puede conocer exactamente su evolución en el tiempo. Pero en el caso de los sistemas caóticos, una mínima diferencia en esas condiciones hace que el sistema evolucione de manera totalmente distinta.

Ejemplos de tales sistemas incluyen la atmósfera terrestre, el Sistema Solar, las placas tectónicas, los fluidos en régimen turbulento y los crecimientos de población.

Tiene como principal representante al químico belga Ilya Prigogine, y plantea que el mundo no sigue estrictamente el modelo del reloj, previsible y determinado, sino que tiene aspectos caóticos.

El observador no es quien crea la inestabilidad o la imprevisibilidad con su ignorancia: ellas existen de por sí, y un ejemplo típico el clima. Los procesos de la realidad dependen de un enorme conjunto de circunstancias inciertas, que determinan por ejemplo que cualquier pequeña variación en un punto del planeta, genere en los próximos días o semanas un efecto considerable en el otro extremo de la tierra.

¿Qué es exactamente el caos?

El nombre de "Teoría del Caos" viene del hecho de que los sistemas que describe la teoría están aparentemente desordenados, pero la Teoría del Caos en verdad busca el orden subyacente en los datos aparentemente aleatorios.

1.2.1. Movimiento caótico.

Para poder clasificar el comportamiento de un sistema como caótico, el sistema debe tener las siguientes propiedades:

- Debe ser sensible a las condiciones iniciales.
- Debe ser transitivo.
- Sus órbitas periódicas deben formar un conjunto denso en una región compacta del espacio básico.

Sensibilidad a las condiciones iniciales significa que dos puntos en tal sistema pueden moverse en trayectorias muy diferentes en su espacio de fase incluso si la diferencia en sus configuraciones iniciales son muy pequeñas. El sistema se comportaría de manera idéntica sólo si sus configuraciones iniciales fueran exactamente las mismas.

Un ejemplo de tal sensibilidad es el así llamado "efecto mariposa", en donde el aleteo de las alas de una mariposa puede crear delicados cambios en la atmósfera, los cuales durante el curso del tiempo podrían modificarse hasta hacer que ocurra algo tan dramático como un tornado. La mariposa aleteando sus alas representa un pequeño cambio en las condiciones iniciales del sistema, el cual causa una cadena de eventos que lleva a fenómenos a gran escala como tornados. Si la mariposa no hubiera agitado sus alas, la trayectoria del sistema hubiera podido ser muy distinta.

La sensibilidad a las condiciones iniciales está relacionada con el exponente Lyapunov. El exponente Lyapunov es una cantidad que

caracteriza el radio de separación de trayectorias infinitesimalmente cercanas.

Transitividad significa que hay muchas órbitas densas.

1.2.2. Sistemas dinámicos .

Los Sistemas dinámicos y teoría del caos son una rama de las Matemáticas, desarrollada en la segunda mitad del Siglo XX, que estudia lo complicado, lo impredecible, lo que no es lineal. A veces se la llama "Matemática de lo no lineal".

En matemáticas, a diferencia de los casos antes mencionados, la palabra caos tiene otro significado. Se trata de una teoría que explica el comportamiento de sistemas dinámicos que varían drásticamente con una pequeña modificación en sus condiciones iniciales. Al comportamiento de estos sistemas se le ha llamado caótico, y es aplicable a una serie de fenómenos físicos, como el clima, el desplazamiento de los continentes, las reacciones químicas, los circuitos eléctricos y la evolución de las poblaciones.

Para los no iniciados en matemáticas, el nombre "Teoría del Caos" puede inducir a error por dos motivos:

1. No necesariamente es una teoría sino que puede entenderse como un gran campo de investigación abierto, que abarca diferentes líneas de pensamiento.
2. Caos está entendido no como ausencia de orden, sino como cierto tipo de orden de características impredecibles, pero descriptibles en forma concreta y precisa. Es decir: un tipo de orden de movimiento impredecible.

La idea de la que parte la Teoría del Caos es simple: en determinados sistemas naturales, pequeños cambios en las condiciones iniciales conducen a enormes discrepancias en los resultados. Este principio suele llamarse efecto mariposa debido a que, en meteorología, la naturaleza no lineal de la atmósfera ha hecho afirmar que es posible que el aleteo de una mariposa en determinado lugar y momento, pueda ser la causa de un terrible huracán varios meses más tarde en la otra punta del globo.

Un ejemplo claro sobre el efecto mariposa es soltar una pelota justo sobre la arista del tejado de una casa varias veces; pequeñas desviaciones en la posición inicial pueden hacer que la pelota caiga por uno de los lados del tejado o por el otro, conduciendo a trayectorias de caída y posiciones de reposo final completamente diferentes. Cambios minúsculos que conducen a resultados totalmente divergentes.

En Teoría del Caos los sistemas dinámicos son estudiados a partir de su "Espacio de Fases", es decir, la representación coordenada de sus variables independientes. En estos sistemas caóticos, es fácil encontrar trayectorias de movimiento no periódico, pero casi-periódicas.

En este esquema se suele hablar del concepto de Atractores Extraños: trayectorias en el espacio de fases hacia las que tienden todas las trayectorias normales. En el caso de un péndulo oscilante, el atractor sería el punto de equilibrio central.

Los atractores extraños suelen tener formas geométricas caprichosas y, en muchos casos, parecidos o similitudes a diferentes escalas. En este caso, a estas formas que son iguales a sí mismas en diferentes escalas, se le ha dado en llamar fractales.

La llamada Teoría del Caos es un nuevo paradigma matemático, tan amplio y tan importante como pudo ser en su época la unión entre geometría y cálculo, surgida del pensamiento cartesiano aunque, quizás, por su inmadurez aún no se tenga claro todo lo que puede dar de sí esta

nueva forma de pensamiento matemático, que abarca campos de aplicación tan dispares como la medicina, la geología o la economía.

La teoría no tiene un solo padre fundador, sino muchos. Entre ellos destacan Lorenz (meteorólogo), Benoit Mandelbrot (ingeniero de comunicaciones), Mitchell Feigenbaum (matemático), Libchaber (físico), Winfree (biólogo), Mandell (psiquiatra), y otros muchos, la mayoría de ellos vivos actualmente.

1.2.3. Atractores

Una manera de visualizar el movimiento caótico, o cualquier tipo de movimiento, es hacer un diagrama de fases del movimiento. En tal diagrama el tiempo es implícito y cada eje representa una dimensión del estado. Por ejemplo, un sistema en reposo será dibujado como un punto, y un sistema en movimiento periódico será dibujado como un círculo.

Algunas veces el movimiento representado con estos diagramas de fases no muestra una trayectoria bien definida, sino que ésta se encuentra errada alrededor de algún movimiento bien definido. Cuando esto sucede se dice que el sistema es atraído hacia un tipo de movimiento, es decir, que hay un atractor.

De acuerdo a la forma en que sus trayectorias evolucionen, los atractores pueden ser clasificados como periódicos, cuasi-periódicos y extraños. Estos nombres se relacionan exactamente con el tipo de movimiento que provocan en los sistemas. Un atractor periódico, por ejemplo, puede guiar el movimiento de un péndulo en oscilaciones periódicas; sin embargo, el péndulo seguirá trayectorias erráticas alrededor de estas oscilaciones debidas a otros factores menores.

1.2.3.1. Atractores extraños

La mayoría de los tipos de movimientos mencionados en la teoría anterior sucede alrededor de atractores muy simples, tales como puntos y curvas circulares llamadas *ciclos limitados*. En cambio, el movimiento caótico está ligado a lo que se conoce como atractores extraños, atractores que pueden llegar a tener una enorme complejidad como, por ejemplo, el modelo tridimensional del sistema climático de Lorenz, que lleva al famoso atractor de Lorenz. El atractor de Lorenz es, quizá, uno de los diagramas de sistemas caóticos más conocidos, no sólo porque fue uno de los primeros, sino también porque es uno de los más complejos y peculiares, pues desenvuelve una forma muy peculiar más bien parecida a las alas de una mariposa.

Los atractores extraños están presentes tanto en los sistemas continuos dinámicos (tales como el sistema de Lorenz) como en algunos sistemas discretos (por ejemplo el mapa Hènon). Otros sistemas dinámicos discretos tienen una estructura repelente de tipo Conjunto de Julia la cual se forma en el límite entre las cuencas de dos puntos de atracción fijos. Julia puede ser sin embargo un atractor extraño. Ambos, atractores extraños y atractores tipo Conjunto de Julia, tienen típicamente una estructura fractal.

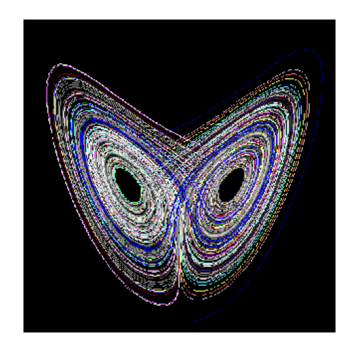
El teorema de Poincaré-Bendixson muestra que un atractor extraño sólo puede presentarse como un sistema continuo dinámico si tiene tres o más dimensiones. Sin embargo, tal restricción no se aplica a los sistemas discretos, los cuales pueden exhibir atractores extraños en sistemas de dos o incluso una dimensión.

Los atractores extraños representan lo "extraño" en el impredecible comportamiento de sistemas caóticos complejos.

(En sistemas simples los atractores suelen ser puntos).

Como escohotado en "Caos y Orden" señala, "La dinámica clásica enseña que cualquier trayectoria supone alguna fuerza, responsable del desplazamiento de tal o cual masa desde un lugar a otro. En contraste con ello, ciertos atractores dependen como cualquier sistema físico de limitaciones externas, pero reelaboran espontáneamente esos límites con cascadas de bifurcaciones, que acaban resolviéndose en alguna fluctuación interna triunfante. A diferencia de los sistemas inerciales, ese tipo de existencia elige hasta cierto punto su evolución, incluyendo algo configurado más parecido a los genes, que está animado y no se despliega en una sino en todas direcciones. El modelo lineal empieza y termina por la predicción, idealizando constantemente su contenido, mientras los atractores son extraños o caprichosos, aunque llevan en sí cierta forma que se auto produce; cada uno de sus momentos va inventándose, y desde esa libertad/necesidad que es su caos "atrae" constantemente algo afín (nunca igual, nunca distinto) a una particular existencia."

Otras gráficas de atractores extraños:





1.2.3.2. Algo más de atractores

Los atractores extraños son curvas del espacio de las fases que describen la trayectoria de un sistema en movimiento caótico. Un sistema de estas características es plenamente impredecible, saber la configuración del sistema en un momento dado no permite predecir con veracidad su configuración en un momento posterior. De todos modos, el movimiento no es completamente aleatorio.

En la mayoría de sistemas dinámicos se encuentran elementos que permiten un tipo de movimiento repetitivo y, a veces, geométricamente establecido. Los atractores son los encargados de que las variables que inician en un punto de partida mantengan una trayectoria establecida, y lo que no se puede establecer de una manera precisa son las oscilaciones que las variables puedan tener al recorrer las órbitas que puedan llegar a establecer los atractores. Por ejemplo, es posible ver y de cierta manera prever la trayectoria de un satélite alrededor de la Tierra; lo que aparece en este caso como algo indeterminado, son los movimientos e inconvenientes varios que se le pueden presentar al objeto para efectuar este recorrido.

1.2.3.4. Aplicaciones y atractores

La Teoría del Caos y la matemática caótica resultaron ser una herramienta con aplicaciones a muchos campos de la ciencia y la tecnología. Gracias a estas aplicaciones el nombre se torna paradójico, dado que muchas de las prácticas que se realizan con la matemática caótica tienen resultados concretos porque los si estrictamente con leyes

deterministas aplicadas a sistemas dinámicos. En Internet se desarrolla este concepto en "Teoría del Caos, el tercer paradigma" -debe buscarse usando comillas-, de como la estadística inferencial trabaja con modelos aleatorios para crear *series caóticas predictoras* para el estudio de eventos presumiblemente caóticos en las Ciencias Sociales. Por esta razón la Teoría del Caos ya no es en sí una teoría: tiene postulados, fórmulas y parámetros recientemente establecidos con aplicaciones, por ejemplo, en las áreas de la meteorología o la física cuántica.

1.3. Teoría del caos como aplicación meteorológica

El clima, además de ser un sistema dinámico, es muy sensible a los cambios en las variables iniciales, es un sistema transitivo y también sus órbitas periódicas son densas, lo que hace del clima un sistema apropiado para trabajarlo con matemática caótica. La precisión de las predicciones meteorológicas es relativa, y los porcentajes anunciados tienen poco significado sin una descripción detallada de los criterios empleados para juzgar la exactitud de una predicción.

Al final del siglo XX se ha vuelto común atribuirles una precisión de entre 80 y 85% en plazos de un día. Los modelos numéricos estudiados en la teoría del caos han introducido considerables mejoras en la exactitud de las previsiones meteorológicas en comparación con las predicciones anteriores, realizadas por medio de métodos subjetivos, en especial para periodos superiores a un día.

En estos días es posible demostrar la confiabilidad de las predicciones específicas para periodos de hasta cinco días gracias a la densidad entre las orbitas periódicas del sistema, y se han logrado algunos éxitos en la predicción de variaciones anormales de la temperatura y la pluviosidad para periodos de hasta 30 días. No es posible contradecir la confiabilidad de las previsiones para periodos de tiempo

más largos debido a que no se han adoptado aún modelos de verificación; no obstante, los meteorólogos profesionales tienden a ponerla en duda.

1.4. Causas

El caos es la complejidad de la supuesta causalidad en la relación entre eventos (eventualidad) sin que se observe un orden rector. Esto significa que cualquier evento insignificante del universo tiene el poder potencial de desencadenar una ola de eventos que alteren el sistema completo. Un ejemplo habitual es el Efecto mariposa, que plantea que el aleteo de una mariposa en un rincón del mundo puede desencadenar un tornado en el otro.

En tal aspecto filosóficamente y, especialmente, epistemológicamente se ha tendido a asociar al *caos* con lo azaroso, lo indeterminado, lo aleatorio, en oposición al orden o a una posible *ratio* o *logos*; tal antinomia binaria tiende a ser superada; desde la segunda mitad del siglo XX el azar (equiparable en cierto modo al caos) y la necesidad (equiparable en cierto modo al orden) son observados, por ejemplo por Jacques L. Monod como dos aspectos complementarios biunívocos en la evolución de lo real, en otras palabras: existen momentos de caos en cuanto son partes de caos ordenado.

1.4.1. Causas pequeñas, grandes efectos.-

El sentido común prescribe una cierta proporción entre la causa y el efecto: una fuerza pequeña produce un movimiento pequeño, y una fuerza grande, un gran desplazamiento. El psicoanálisis invoca la misma idea para justificar la idea de que una terapia breve produce pequeños cambios, y de que un tratamiento prolongado genera cambios más importantes.

Sin embargo, ciertas experiencias cotidianas y determinados planteos científicos nos obligan a considerar la posibilidad de algunas excepciones de aquellas impresiones subjetivas que habitan nuestra mente de físicos o

psicólogos aficionados, tan acostumbrada a transitar la siempre útil, pero también la siempre peligrosa navaja de Occam, que todo lo simplifica.

Examinemos entonces algunos ejemplos de desproporción cuantitativa -aparente o no- entre causas y efectos:

a) Efecto palanca: más allá de la metáfora, si uno tiene alguna palanca puede conseguir muchas cosas: "dadme una palanca y moveré el mundo", había dicho el griego. Un simple movimiento de palanca es una causa pequeña, pero puede producir grandes efectos. Las palancas, así como las poleas o las prensas hidráulicas, son dispositivos capaces de multiplicar varias veces un efecto, con el consiguiente ahorro de esfuerzo muscular.

b) Efecto gota de agua: Si agregamos una simple gota de agua al líquido contenido en un recipiente, este se derrama produciendo un efecto catastrófico sobre nuestros zapatos. Una gota más que agreguemos en la tortura china de la gota de agua que horada la piedra, producirá la insanía de quien la recibe. Una simple interpretación más, como al pasar, puede producir en el paciente un notable efecto de insight, en comparación con la aparente nimiedad de lo interpretado. Desde una lógica dialéctica, el efecto gota de agua es el producto de una acumulación cuantitativa que desemboca en un salto cualitativo.

c) Efecto interacción experimental: Descrito en algunos diseños experimentales, donde la acción conjunta de dos variables, lejos de producir un simple efecto sumativo, pueden generar un efecto inesperadamente mayor (o menor). Pequeñas cantidades de alcohol y de droga, combinadas entre sí, pueden producir un efecto desmesurado: el coma o la muerte (a).

d) Los fenómenos de cismo génesis descriptos por Gregory Bateson, y las escaladas simétricas o las "escapadas" mencionadas por Paul Watzlawick, todos fenómenos interpretables en términos de mecanismos de retroalimentación positiva.

e) Von Bertalanffy, el mentor de la Teoría General de los Sistemas, describe la existencia de mecanismos amplificadores donde pequeñas causas generan grandes efectos (73, 223). Al respecto, cita un distinción entre causalidad de "conservación", donde hay una proporcionalidad razonable entre las intensidades de la causa y el efecto, y la causalidad de "instigación", donde la causa actúa como instigadora o disparadora, es decir, un cambio energéticamente insignificante provoca un cambio considerable en el sistema total.

f) Series complementarias: Hemos ya citado un ejemplo donde un factor desencadenante pequeño puede desatar clínicamente una psicosis o una neurosis, o puede sumir a una persona en una profunda crisis. La razón, según el psicoanálisis, debemos buscarla en el peso relativo que tiene cada elemento de la constelación de los factores que constituye la serie: si el factor constitucional y el factor disposicional (experiencias infantiles) son altamente propicios para configurar un cuadro neurótico, basta un muy pequeño factor desencadenante para que la sintomatología aparezca.

g) La conversión masa-energía: Según lo prescribe el principio de equivalencia masas-energía de Einstein, una pequeñísima porción de masa, bajo ciertas condiciones puede liberar enormes cantidades de energía. Ya en la física pre-einsteniana también se hablaba se cosas parecidas, en el contexto del concepto de energía potencial: una pequeña causa (soltar una piedrita a 3000 metros de altura), produce un efecto desastroso sobre la cabeza del que está abajo, considerando

que la aceleración aumenta según la ley de la gravitación y sin considerar los efectos de rozamiento del aire.

1.5.Fractales.

Un fractal es un objeto semi geométrico cuya estructura básica, fragmentada o irregular, se repite a diferentes escalas.

El término fue propuesto por el matemático Benoît Mandelbrot en 1975 y deriva del Latín fractus, que significa quebrado o fracturado. Muchas estructuras naturales son de tipo fractal.

A un objeto geométrico fractal se le atribuyen las siguientes características:

- Es demasiado irregular para ser descrito en términos geométricos tradicionales.
- Posee detalle a cualquier escala de observación.
- Es auto similar (exacta, aproximada o estadísticamente).
- Su dimensión de Hausdorff-Besicovitch es estrictamente mayor que su dimensión topológica.
- Se define mediante un simple algoritmo recursivo.

No nos basta con una sola de estas características para definir un fractal. Por ejemplo, la recta real no se considera un fractal, pues a pesar de ser un objeto auto similar carece del resto de características exigidas.

Un fractal natural es un elemento de la naturaleza que puede ser descrito mediante la geometría fractal. Las nubes, las montañas, el sistema circulatorio, las líneas costeras o los copos de nieve son fractales naturales. Esta representación es aproximada, pues las propiedades atribuidas a los objetos fractales ideales, como el detalle infinito, tienen límites en el mundo natural.

Un objeto fractal debería tener al menos una de las siguientes características:

- Existe similitud entre detalles a gran escala y a pequeña escala
- No se puede representar por medio de la geometría clásica
- Su dimensión es fraccionaria, es decir, no es entera
- Se puede definir recursivamente

Los fractales son figuras geométricas que no se pueden definir a través de la geometría clásica. Aunque el ser humano tiende a abstraer las figuras de los objetos a esferas, cuadrados, cubos, etcétera, la mayoría de las figuras que se encuentran en la naturaleza son de geometría fractal.

Los fractales están siendo estudiados en muchos campos de la ciencia, tecnología y del arte, y están teniendo aplicaciones importantes.

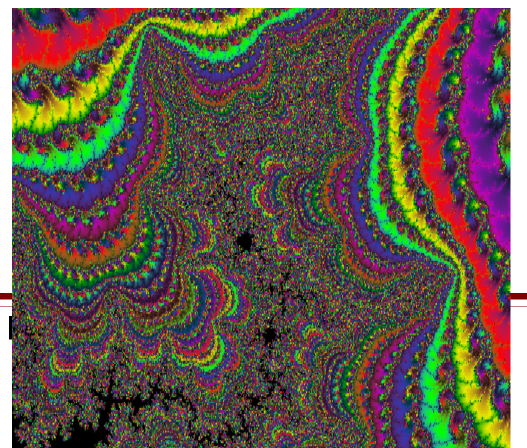
Una de las características más significativa de los fractales es que surgen a partir de acciones muy básicas, como el Conjunto de Cantor, que inicialmente parte de una recta y a partir de reglas muy básicas se convierte en una estructura compleja.

Otra de las características de los fractales es la:

Auto similitud, cuando se cambia de escala en la representación de algún fractal la imagen que resulta es de gran similitud a la imagen origen. Por tanto, se puede decir que los fractales son autorecurrentes.

Ejemplos de fractales con estas características son el Copo de nieve de Koch o los Conjunto de Julia.

Una de las preguntas más complejas sobre los fractales es cuál es su tamaño. Si se toma como ejemplo el copo de nieve de Koch, es posible afirmar que su dimensión no es exacta y que, por tanto, no se puede usar la geometría de Euclides para calcularla.



1.6. Complejidad.

Se ha demostrado que en el caos determinista de sistemas dinámicos simples subyace un orden oculto tras sus fenómenos manifiestamente complicados y aleatorios. Estos fenómenos caóticos, pese a su carácter determinista, son impredecibles.

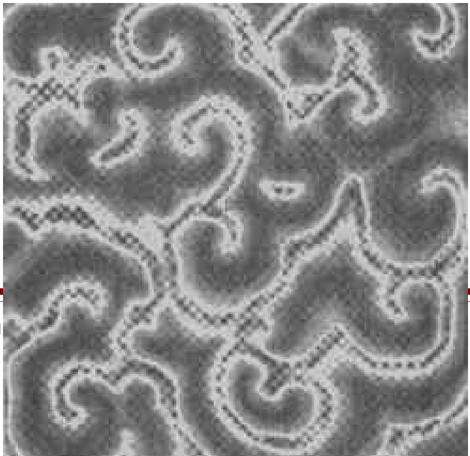
En los sistemas no lineales hay propiedades emergentes, que aparecen como resultado de la interacción entre sus partes y que no pueden explicarse a partir de las propiedades de sus elementos componentes.

Pero la complejidad no es, necesariamente, sinónimo de complicación. Sólo habría que enfocar el mundo desde una visión basada en la no linealidad. Tanto la geometría como la dinámica de muchos sistemas naturales (y, en efecto, caóticos) se pueden abordar desde enfoques simples.

La hipótesis de la frontera del caos establece que la complejidad aparece en unas condiciones muy especiales, conocidas como puntos críticos, o puntos de bifurcación.

En dichos momentos orden y desorden coexisten, formándose estructuras fractales que se caracterizan por presentar un aspecto autosemejante a diferentes escalas.

Por ejemplo, en la figura se ve una simulación de poblaciones de presas y depredadores: la estructura es fractal.



Capítulo II

II.EL EFECTO MARIPOSA

2.1 ¿Qué es el efecto mariposa?

Esta interrelación de causa-efecto se da en todos los eventos de la vida. Un pequeño cambio puede generar grandes resultados o poéticamente: "el aleteo de una mariposa en Hong Kong puede desatar una tormenta en Nueva York".

La idea es que, dadas unas condiciones iniciales de un determinado sistema natural, la más mínima variación en ellas puede provocar que el sistema evolucione en formas totalmente diferentes. Sucediendo así que, una pequeña perturbación inicial, mediante un proceso de amplificación, podrá generar un efecto considerablemente grande.

La consecuencia práctica del efecto mariposa es que en sistemas complejos tales como el estado del tiempo o la bolsa de valores es muy difícil predecir con seguridad en un mediano rango de tiempo. Los modelos finitos que tratan de simular estos sistemas necesariamente descartan información acerca del sistema y los eventos asociados a él. Estos errores son magnificados en cada unidad de tiempo simulada hasta que el error resultante llega a exceder el ciento por ciento.

Debe también tenerse en cuenta la relación del efecto mariposa, con el concepto del Solipsismo, término que proviene de unas palabras latinas que significan "Sólo uno mismo" utilizado en la novela de Ciencia Ficción de Ursula K. LeGuin The Late of Heaven y en el film del mismo nombre. Hoy en dia a todo el mundo le suena “El efecto mariposa”, pero casi nadie sabe lo que es; su explicación es bastante compleja.

2.2 DEFINICION

Hacia 1960, el meteorólogo Edward Lorenz se dedicaba a estudiar el comportamiento de la atmósfera, tratando de encontrar un modelo matemático, un conjunto de ecuaciones, que permitiera predecir a partir de variables sencillas,

mediante simulaciones de ordenador, el comportamiento de grandes masas de aire, en definitiva, que permitiera hacer predicciones climatológicas.

Lorenz realizó distintas aproximaciones hasta que consiguió ajustar el modelo a la influencia de tres variables que expresan como cambian a lo largo del tiempo la velocidad y la temperatura del aire. El modelo se concretó en tres ecuaciones matemáticas, bastante simples, conocidas, hoy en día, como modelo de Lorenz.

Pero, Lorenz recibió una gran sorpresa cuando observó que pequeñas diferencias en los datos de partida (algo aparentemente tan simple como utilizar 3 ó 6 decimales) llevaban a grandes diferencias en las predicciones del modelo. De tal forma que cualquier pequeña perturbación, o error, en las condiciones iniciales del sistema puede tener una gran influencia sobre el resultado final. De tal forma que se hacía muy difícil hacer predicciones climatológicas a largo plazo. Los datos empíricos que proporcionan las estaciones meteorológicas tienen errores inevitables, aunque sólo sea porque hay un número limitado de observatorios incapaces de cubrir todos los puntos de nuestro planeta. Esto hace que las predicciones se vayan desviando con respecto al comportamiento real del sistema.

Lorenz intentó explicar esta idea mediante un ejemplo hipotético. Sugirió que imaginásemos a un meteorólogo que hubiera conseguido hacer una predicción muy exacta del comportamiento de la atmósfera, mediante cálculos muy precisos y a partir de datos muy exactos. Podría encontrarse una predicción totalmente errónea por no haber tenido en cuenta el aleteo de una mariposa en el otro lado del planeta. Ese simple aleteo podría introducir perturbaciones en el sistema que llevaran a la predicción de una tormenta.

De aquí surgió el nombre de efecto mariposa que, desde entonces, ha dado lugar a muchas variantes y recreaciones.

Se denomina, por tanto, efecto mariposa a la amplificación de errores que pueden aparecer en el comportamiento de un sistema complejo. En definitiva, el efecto

mariposa es una de las características del comportamiento de un sistema caótico, en el que las variables cambian de forma compleja y errática, haciendo imposible hacer predicciones más allá de un determinado punto, que recibe el nombre de horizonte de predicciones.

El "efecto mariposa" es un concepto que hace referencia la noción de sensibilidad a las condiciones iniciales dentro del marco de la teoría del caos.

Su nombre proviene de un antiguo proverbio chino: "el aleteo de las alas de una mariposa se puede sentir al otro lado del mundo".

La idea es que, dadas unas condiciones iniciales de un determinado sistema natural, la más mínima variación en ellas puede provocar que el sistema evolucione en formas totalmente diferentes. Sucediendo así que, una pequeña perturbación inicial, mediante un proceso de amplificación, podrá generar un efecto considerablemente grande.

Un ejemplo claro sobre el efecto mariposa es soltar una pelota justo sobre la arista del tejado de una casa varias veces; pequeñas desviaciones en la posición inicial pueden hacer que la pelota caiga por uno de los lados del tejado o por el otro, conduciendo a trayectorias de caída y posiciones de reposo final completamente diferentes. Cambios minúsculos que conducen a resultados totalmente divergentes.

Esta interrelación de causa-efecto se da en todos los eventos de la vida. Un pequeño cambio puede generar grandes resultados o poéticamente: "el aleteo de una mariposa en Hong Kong puede desatar una tormenta en Nueva York".

La consecuencia práctica del efecto mariposa es que en sistemas complejos tales como el estado del tiempo o la bolsa de valores es muy difícil predecir con seguridad en un mediano rango de tiempo. Los modelos finitos que tratan de simular estos sistemas necesariamente descartan información acerca del sistema y

los eventos asociados a él. Estos errores son magnificados en cada unidad de tiempo simulada hasta que el error resultante llega a exceder el ciento por ciento.Edward Lorenz fue involuntariamente uno de los descubridores del "caos".

Debe también tenerse en cuenta la relación del efecto mariposa, con el concepto del Solipsismo, término que proviene de unas palabras latinas que significan "Sólo uno mismo" utilizado en la novela de Ciencia Ficción de Ursula K. LeGuin The Late of Heaven y en el film del mismo nombre.

2.3 REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA

Hoy en dia a todo el mundo le suena "El efecto mariposa", pero casi nadie sabe lo que es; su explicacion es bastante compleja.

Un meteorologo llamado Edward Lorenz penso hacia 1960 que si encontraba un modelo matemático exacto que abarcara las predicones meteorologicas, podria predecir con bastante antelación el comportamiento de la atmosfera. despues de trabajar mucho llego a un modelo de tres ecuaciones matemáticas, bastante simples que variaban con la temperatura y la velocidad del aire:

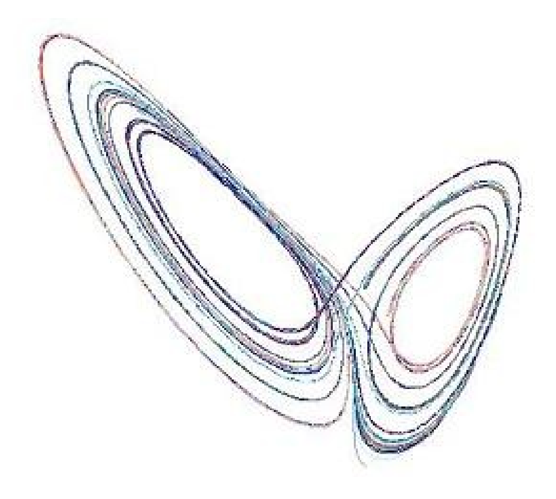
$$x' = -ax + ay$$

$$y' = -xz + rx - y$$

$$z' = xy - bz$$

x', y', z', representan las primeras derivadas en las variables x, y, z.

a , b, y r son constantes, relacionadas con las condiciones climáticas; tales como presión, temperatura, etc.Su solucion es un numero, pero no he llegado a saber como resolverlas. Representada Graficamente seria:



Pero Lorenz recibió una gran sorpresa cuando vió que las minima diferencia en los datos de salida(usar una diferencia de 0.0000000000001), el resultado final cambiaba enormemente, por lo que era imposible la idea de Lorenz de hacer prediciones meteorologicas a largo plazo.

Los datos empíricos que proporcionan las estaciones meteorológicas tienen errores inevitables, aunque sólo sea porque hay un número limitado de observatorios incapaces de cubrir todos los puntos de nuestro planeta. Esto hace que las predicciones se vayan desviando con respecto al comportamiento real del sistema.

Lorenz intentó explicar esta idea mediante un ejemplo hipotético. Sugirió que imaginásemos a un meteorólogo que hubiera conseguido hacer una predicción muy exacta del comportamiento de la atmósfera, mediante cálculos muy precisos y a partir de datos muy exactos. Podría encontrarse una predicción totalmente errónea por no haber tenido en cuenta el aleteo de una mariposa en el otro lado del planeta**.** Ese simple aleteo podría introducir perturbaciones en el sistema que llevaran a la predicción de una tormenta.

De aquí surgió el nombre de efecto mariposa que, desde entonces, ha dado lugar a muchas variantes y recreaciones. Tambien de aqui surgieron los sistemas caóticos (pensar en Matrix)

En resumen el efecto Mariposa es la amplificacion de errores, un error mínimo lleva a uno máximo. Es el comportamiento erratico de un sistema que se balancea a si mismo, haciendo imposible las prediciones mas alla de un determinado punto (horizonte de prediciones).

2.4 Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas

En el proceso de creación de un modelo de simulación es frecuente encontrar que los elementos del sistema se comportan de manera sorprendente e incluso totalmente inesperada. También puede ocurrir que los cambios que efectuamos en las condiciones iniciales produzcan efectos contrarios o muy distintos a los previstos, y aún más, que pequeños cambios en los valores iniciales generen grandes diferencias en el comportamiento de los elementos del sistema.

Quizás sin saberlo hemos creado un modelo de simulación con una estructura y una forma de relación entre variables tal que, bajo determinadas condiciones, presenta una forma de comportamiento que se conoce como caos. Una definición del caos establece que es "un comportamiento aperiódico en un sistema determinista que muestra gran sensibilidad respecto a las condiciones iniciales".

No es necesario que el modelo de simulación tenga un aspecto extremadamente complejo, con muchas variables, parámetros y retroalimentaciones. Los numerosos estudios realizados respecto al tema establecen que con tres ecuaciones diferenciales y una no-linealidad en alguna de ellas tenemos las condiciones necesarias para que el sistema presente bajo ciertas condiciones un comportamiento caótico.

En las últimas décadas del siglo XX la Teoría del Caos ha despertado considerable interés, ya que muestra la realidad interconectada que nos rodea y llena de bucles de retroalimentación, donde cada elemento integrante actúa para modificar el comportamiento del medio que la rodea, pero no lo hace en forma independiente sino obedeciendo a un comportamiento integrado del conjunto. Esta teoría es

particularmente útil para abordar el estudio de los fenómenos sociales, siempre complejos y difíciles de resolver en términos de relaciones lineales causa-efecto.

Afortunadamente hay ejemplos de fenómenos físicos o de sistemas puramente matemáticos que facilitan la comprensión de los comportamientos caóticos antes de pasar a situaciones mucho más difíciles de modelar, como son los fenómenos sociales. Entre ellos, el péndulo forzado como fenómeno físico o una ecuación diferencial de tercer orden como modelo matemático. Tenemos otro ejemplo aún más conocido por sus repercusiones cinematográficas, originado en el trabajo del meteorólogo Edward Lorenz, quien hace más de cuarenta años construyó un sistema de tres ecuaciones diferenciales con el objeto de modelar de manera sencilla el comportamiento meteorológico, con el cual logró una respuesta tan sorprendente como llamativa y que se conoce popularmente como el "Efecto mariposa".

En la década de 1960 el meteorólogo Edward Lorenz inició una serie de investigaciones orientadas a resolver el problema de la predicción meteorológica. Trabajando sobre una atmósfera bidimensional rectangular, cuya zona inferior está a una temperatura mayor que la zona superior, y partiendo de las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y balance térmico, desarrolló un sistema simplificado formado por tres ecuaciones diferenciales.

Es importante observar que se trata de tres ecuaciones diferenciales que presentan dos no linealidades. Por ello este sistema reúne las condiciones para que aparezcan comportamientos caóticos en sus variables de estado (las "variables de estado" se denominan Niveles en Dinámica de Sistemas).

Podemos representar estas ecuaciones con un modelo de simulación dinámica. No obstante es necesario tener en cuenta que las ecuaciones precedentes resultan de un proceso usual en el análisis de fenómenos físicos y químicos, consistente en la adimensionalización de las variables. Consecuencia de este proceso es la aparición de agrupaciones de parámetros (por ejemplo densidad, viscosidad, longitudes

características) conocidas como números adimensionales, que en definitiva establecen relaciones entre las fuerzas impulsoras del cambio en el sistema en estudio, o sea de su dinámica.

El modelo creado está formado de tres Niveles, denominados Flujo Convectivo, Diferencia de Temperatura Horizontal y Diferencia de Temperatura Vertical, que dependen de sus respectivos Flujos, que son: Variación del flujo convectivo, Variación de temperatura horizontal y Variación de temperatura vertical. Por otra parte, existen tres parámetros adimensionales: el Número de Prandtl, que establece una relación entre la viscosidad y la conductividad térmica del fluido, el Número de Rayleigh, que cuantifica la transmisión de calor en una capa de fluido con producción interna de calor por radiación, y la Altura, que representa el espesor de la capa en estudio.

En esencia, el modelo establece la relación entre el flujo convectivo y las variaciones de temperatura en la masa de aire, la cual es de por sí compleja dado que una diferencia de temperatura produce un flujo convectivo, pero a su vez este flujo modifica la diferencia de temperatura, todo ello condicionado a las propiedades del medio estudiado, tales como viscosidad, densidad, o conductividad térmica, las cuales se encuentran agrupadas en los números adimensionales que aparecen como parámetros del modelo.

Podemos construir un gráfico XY que nos compare la evolución conjunta de dos variables, por ejemplo el gráfico del Flujo Convectivo (en el eje X) en relación a la Diferencia de Temperatura Vertical (en el eje Y). Para hacerlo acudimos al menú de la barra superior: Windows - Control Panel - New y seleccionamos las variables tal y como se indica en la siguiente figura:

En rigor, lo que estamos haciendo es graficando el espacio de fases. El espacio de fases es el espacio matemático formado por las variables que describen un sistema dinámico. Cada punto del espacio de fases representa un posible estado del

sistema. La evolución en el tiempo del sistema se representa con una trayectoria en el espacio de fases.

El estudio del espacio de fases reviste un interés especial. Los sistemas disipativos presentan regiones del espacio de fases hacia la cual convergen las trayectorias que parten de una determinada región, llamada "cuenca del atractor". Hay atractores predecibles, de estructura simple, como el punto o el ciclo límite. Pero hay otros atractores, conocidos como atractores extraños, en los cuales pequeñas diferencias en las posiciones iníciales conducen a posiciones que divergen totalmente. Este es precisamente el caso del atractor de Lorenz, con su curiosa forma similar a una mariposa.

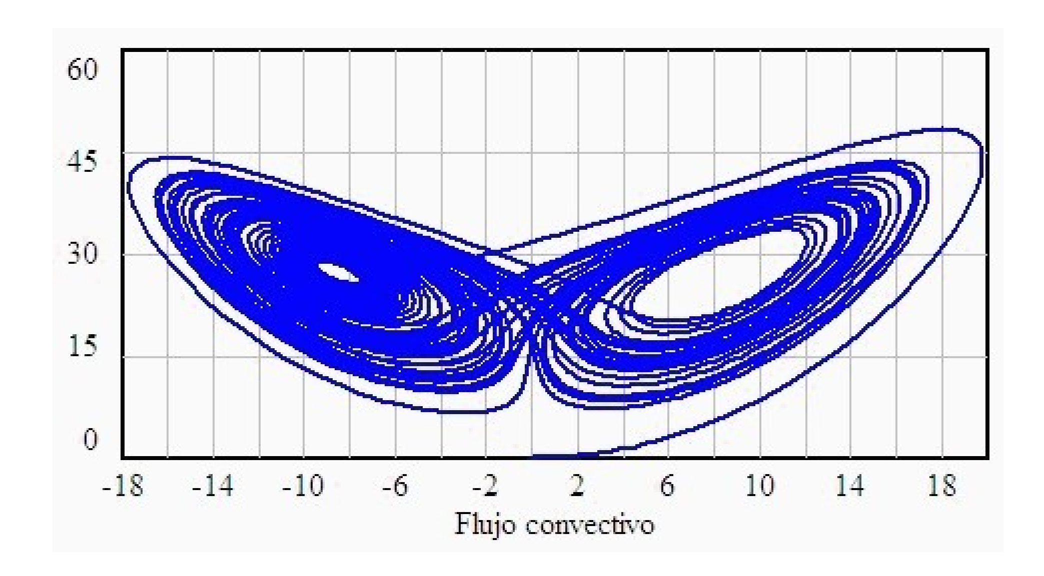
Es probable que las evoluciones temporales de las variables, en general complejas, no permitan sacar conclusiones rápidas ni efectuar predicciones válidas, pero el análisis del espacio de fases si nos permite ver hacia donde converge el estado del sistema, y entre que valores máximos y mínimos de sus variables evoluciona. Todo esto constituye una información de gran valor cuando se aborda el estudio de las complejas situaciones que caracterizan al mundo en que vivimos.

Edward Lorenz descubrió este inesperado comportamiento en 1963, cuando efectuaba las primeras simulaciones con el modelo que estaba estudiando. Sin proponérselo, había desarrollado un valioso ejemplo práctico de comportamiento caótico, que venía a afirmar lo que ya se había planteado en forma teórica muchos años antes. En 1890 Henri Pointcaré publicó un artículo describiendo el hecho de que el sistema sol-tierra-luna no puede ser explicado bajo la mecánica tradicional.

En sus palabras: "sucede que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales impactan grandemente en el fenómeno final. Un pequeño cambio al principio provoca enormes errores al final. La predicción se vuelve imposible". Posteriores estudios acerca del tema han permitido desarrollar numerosos ejemplos de

sistemas físicos, químicos, biológicos y matemáticos que presentan este fenómeno de impredecibilidad, el cual ha sido llamado "caos determinista".

Hallamos un buen ejemplo en el libro de Julien Sprott titulado "Chaos and Time-Series análisis" en el cual propone entre otros un sencillo modelo con tres variables. La visión sistémica y las poderosas herramientas de cálculo existentes permiten analizar muy rápidamente los problemas de comportamiento caótico, con la ventaja de disponer de una clara imagen visual de la estructura del sistema y sus interrelaciones. Asimismo, es inmediata la construcción de los espacios de fases y la búsqueda de atractores, lo cual no debe ser visto como un mero ejercicio matemático.



2.5. Efecto mariposa en otras ciencias

Así como en la rama de la ciencia científica, el efecto mariposa a la vez repercute también en la otras ciencias de estudios, entre ellas la economía, la política, las ciencias sociales, entre otras. Por esta razón daremos un rápido vistazo de cómo estas son afectadas por el efecto mariposa.

2.5.1. En efectos en el clima.

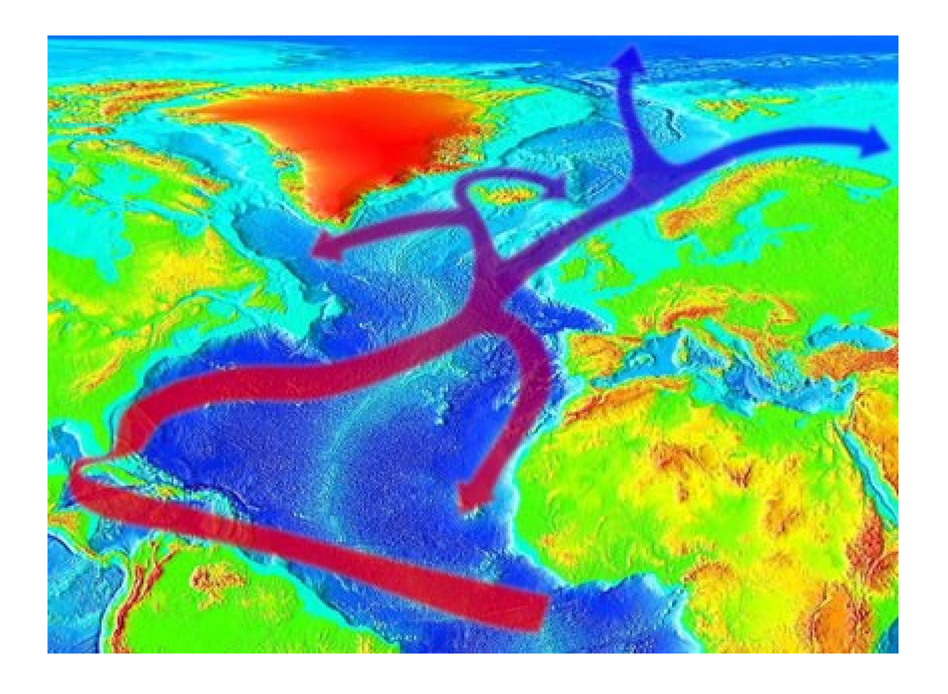
El clima resulta ser un sistema no lineal en donde numerosos procesos han mostrado la dificultad de poderse predecir más allá de un cierto umbral temporal. Del mismo, modo los denominados sistemas complejos o no lineales son los que se rigen por una dinámica que se encuentra a “medio camino” entre los caóticos y los deterministas (que sí son predecibles; aunque también se da el caos en alguna clase de ellos). Por otro lado, dependiendo de la naturaleza de las formulaciones matemáticas de un modelo de simulación numérica, los resultados pueden ser estables, lineales y graduales, o inestables, súbitos e impredecibles. Digamos para finalizar que el efecto mariposa es una exageración ilustrativa, pero de cualquier modo desproporcionada.

Ya hablamos sobre la teoría del recalentón (Cambio Climático: Hacía una Península Más Cálida o Más Fría), por la cual es plausible que, en lugar de dirigirnos a un calentamiento, un incremento excesivamente rápido de las emisiones, nos condujera a una fase de enfriamiento, transitoria o no. Pues bien, el nueve de junio de 2006 el Boletín de Noticias mi+d se hacía eco de la siguiente noticia: “Variaciones en los vientos podrían haber llevado a un cambio climático abrupto glacial”. Seguidamente, exponemos una buena parte del contenido de la investigación mencionada:

Científicos de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y del Instituto de Potsdam para la Investigación del Impacto Climático, en

Alemania, han realizado una investigación en la que se señala que pequeñas alteraciones en los vientos superficiales marinos han podido jugar un importante papel en el cambio climático abrupto, ocurrido durante el último período glacial, cuyas causas no son aún del todo conocidas. La investigación ha sido publicada en la prestigiosa revista científica Geophysical Research Letters y ha recibido una mención especial por parte de la American Geophysical Union.

El trabajo, realizado por los investigadores Marisa Montoya y Anders Levermann, ha concluido que existe un punto a partir del cual una variación muy pequeña en la fuerza de los vientos de superficie marinos se ve correspondida con un cambio drástico en la intensidad de la circulación atlántica. Según Marisa Montoya, "si el clima glacial se hubiera encontrado próximo a ese umbral, esos pequeños cambios en los vientos podrían haber dado lugar a cambios climáticos abruptos en ese período.



El estudio se ha basado en simulaciones climáticas del llamado "último máximo glacial" (el período de máxima extensión de las masas de hielos perpetuos, que tuvo lugar hace unos 21.000 años). Estas simulaciones han

mostrado la existencia de un umbral a partir del cual una pequeña variación en la fuerza de los vientos de superficie trae consigo una importante alteración en la intensidad de la circulación oceánica. Los resultados apuntan a que estas variaciones en los vientos podrían haber tenido una especial relevancia en el cambio climático abrupto del último período glacial.

La simulación del clima durante el último máximo glacial es uno de los mayores retos que afrontan los expertos en esta área. La comparación entre los resultados de estas simulaciones con las reconstrucciones climáticas realizadas a partir de datos obtenidos de elementos naturales como los sedimentos marinos o el hielo más antiguo permite, por una parte, evaluar los modelos climáticos en condiciones independientes y distintas a aquellas bajo las que se construyen. Por otra, posibilita la obtención de hipótesis acerca de cuáles son los mecanismos físicos responsables de los cambios climáticos observados en las reconstrucciones.

Tanto las simulaciones como las reconstrucciones climáticas apuntan a que las variaciones en la circulación oceánica en el Atlántico pueden haber sido el principal mecanismo responsable del cambio climático abrupto durante el último período glacial. Esta circulación juega un papel fundamental en la regulación del clima a nivel global**,** ya que transporta grandes cantidades de agua relativamente cálida desde latitudes inferiores hasta las regiones más septentrionales, suavizando así el clima de países como Noruega o Irlanda, en comparación con otros lugares de la misma latitud, pero con climas mucho más severos, como Alaska o Nueva York. Este trabajo sugiere que los cambios en la circulación oceánica pueden haber estado producidos por variaciones en la intensidad del viento de superficie.

Puedes observar, como en nuestro post de la teoría del recalentón, vuelve a hablarse de la corriente termohalina**,** que tanto condiciona el clima de la

Península Ibérica, por ejemplo. Hoy en día los expertos son más receptivos a la posibilidad de este tipo de saltos bruscos, por lo que entre la comunidad científica se debate cual podría ser el desenlace final de nuestro inexcusable experimento planetario. Digamos también que la noticia nos habla de una posibilidad (un modelo) plausible pero nada más, aunque también nada menos. Eso sí, no confundamos las predicciones de un modelo con la realidad.

Durante muchos años, los ultra-defensores de la existencia del calentamiento, es decir sus "voceros", reiteraban una y otra vez que los cambios actuales del sistema climático eran más bruscos que los que acaecieron bajo condiciones naturales. Ya hemos mostrado casos que respaldan con rotundidad la frecuencia con la que acaecen tales transformaciones radicales, como en el post que escribimos sobre la relación entre terremotos e inundaciones catastróficas. Pero hay más.

Aquellos voceros se fiaban sin dudar de cronologías y eventos obtenidos de diversas fuentes (dataciones por radioisótopos, registros sedimentarios, análisis de hielos en los polos, estudios polínicos, etc.).

Debemos enfatizar que, hoy por hoy, cuando más nos retrotraemos en el tiempo, más imprecisos son tales datos. Saber que un cambio climático ocurrió entre dos fechas concretas (un determinado intervalo de años), no significa a menudo que no pudiera ser muy rápido. Pero la misión de los voceros es alarmar para que el ciudadano abrace su causa. No obstante, como vemos, tales proclamas panfletarias terminan siendo dañinas y confundentes. Seguiremos hablando del caos y los sistemas complejos en futuros post.

Reflexiones Edafológicas: Cambios abruptos de la edafosfera

Lo dicho hasta aquí tiene notables repercusiones en la edafosfera. Si uno o varios factores formadores cambian bruscamente, sus efectos repercutirán

"más o menos" inmediatamente sobre el suelo. Así, por ejemplo, un cambio brusco hacia una glaciación afectaría primero al clima, pero después también a la biota y más tarde a la fisiografía. Por lo tanto, aunque con cierto retraso, un cambio climático global repercutirá sobre toda la edafosfera planetaria, modificando sus propiedades, distribución geográfica de los tipos de suelos, calidades de los mismos, extensión superficial, etc.

Hoy sabemos que la historia de la Tierra ha estado jalonada de ellos. No consideremos a los suelos como entes estáticos. Así, en el Pérmico, se generó una era glaciar que afecto a una buena parte del Planeta, causando una enorme extinción de especies. Por lo tanto, cabe suponer que grandes masas de tierra (y por tanto de suelo) quedaron sepultadas por gruesas láminas de hielo, mientras que otra buena parte de la edafosfera debieran haber haber estado constituida por Gelisuelos (Criosuelos), y/o al menos albergar estructuras de permafrost. Desde luego, si no en este periodo, hoy si se sabe que la Tierra se ha helado desde los polos al ecuador en varias ocasiones.

Hay evidencias directas de que la Tierra queda afectada por glaciaciones durante, al menos, el 5-10% de su historia. La primera gran glaciación generalizada fue la Huroniana, hace 2.400-2.300 m.a.

También hay un gran periodo de glaciaciones dentro del Neoproterozoico, que da nombre a una edad de la Tierra, el Criogénico, que va desde hace 850 a hace 630 m.a., con las grandes glaciaciones Sturtian y Varanger. Ya en el Paleozoico, se pueden observar diferentes glaciaciones en Gondwana conforme se sitúa en el polo sur en varias ocasiones (Ordovícico final, Carbonífero final y Pérmico inicial). La siguiente época de glaciaciones nos ha tocado en suerte: es el Cuaternario.

2.5.2. La educación y el efecto mariposa

Los sistemas educativos son complejos y en ellos se producen también efectos mariposa, de forma que pequeñas variaciones en datos iniciales conducen a situaciones finales que en nada se parecen a lo esperado.

Después de leer algunas de esas reseñas sobre las teorías de Lorenz, reflexionaba sobre nuestra profesión de educadores y el comportamiento de nuestro Sistema Educativo. Y asociaba los procesos que, a veces, ocurren en él con el *efecto mariposa* expuesto por Lorenz. En efecto, los que profesionalmente hemos conocido diferentes centros y participado, de alguna manera, en los procesos educativos que en ellos se han dado, hemos tenido, en más de una ocasión, la oportunidad de observar cómo pequeñas variaciones en datos iniciales, pueden desencadenar procesos con conclusiones muy diferentes e inesperados, que alguien los podría calificar de efectos caóticos.

Los Sistemas Educativos son, sin duda, sistemas complejos, en los que se producen múltiples y variadas relaciones que interactúan de diferentes formas y, en esos procesos, pequeñas variaciones en los datos iniciales, conducen a situaciones finales que en nada se parecen a lo esperado.

Aquí podría estar la explicación de por qué resulta tan difícil, en tantas ocasiones, trasladar experiencias educativas que funcionan bien de unos contextos, a otros que en principio podría parecer análogos. La práctica muestra que los resultados no son, ni los mismos, ni tan exitosos como en el lugar de origen. Pequeñas diferencias producen efectos muy distintos.

En otras ocasiones, pequeños sucesos han producido inesperadas y amplificadas consecuencias. Por poner un ejemplo, no muy lejano, ¿quién podía prever que por el ataque de un perro a un alumno de un IES de nuestra provincia, se podía producir una de las mayores concentraciones

de profesores y una huelga? Sin duda este podría ser un arquetipo de proceso caótico o *efecto* mariposa .

En otro ejemplo, análogo a los que tantos profesores han vivido, una alumna ejemplar por su inteligencia, capacidad de trabajo, actitud y dedicación, lo que se traducía en sus sobresalientes notas, cambia de centro y al recibir, en los primeros días un suspenso en una materia determinada, acaba dejando los estudios con las consiguientes consecuencias desastrosas para ella misma y para nuestra sociedad. Y también podríamos poner ejemplos contrarios. Lo podríamos asimilar al *efecto* mariposa .

Con una diferencia fundamental, en educación, tratamos con personas y con el futuro de esas personas, no con factores atmosféricos. Y por ello tendríamos que intentar seguir a Lorenz, tratando de ser, en la medida de nuestras posibilidades, "un modelo de inteligencia, integridad y de modestia". Haciendo que nuestro sistema sea más racional, positivo, eficiente y, sobre todo, humano, a pesar de todos los efectos mariposa que puedan surgir inesperadamente. Pues dentro mismo de la racionalidad, aparece la indeterminación de lo inesperado.

2.5.3. La paz y el efecto mariposa

En el mundo todo es dialéctico. No porque lo hayan dicho Hegel o Marx, y antes de ellos el presocrático Heráclito, sino porque esa es la ley de las cosas, regida por el caos y por el cosmos, y por lo sim-bólico (lo que une) y por lo dia-bólico (lo que desune). El efecto dialéctico de la guerra de la vergüenza, movida por Bush contra Irak, es el triunfo del movimiento por la paz a través del mundo entero. Los constructores de la paz no son solamente los grupos pacifistas, lo es también la sociedad civil mundial que se convenció (por fin) de que la guerra no es solución para ningún problema. La guerra es un problema para la humanidad, pues si no se la controla acabará con ésta. Y esta vez no podemos vacilar.

En los días previos a la guerra, e incluso después, continuaron por el mundo las manifestaciones a favor de la paz. Un interlocutor escéptico del interior de la selva amazónica informó por correo electrónico que también allí se hicieron manifestaciones por la paz, con indios, seringueros y ribereños, llevando cartelones y gritando consignas. Y pedía mi opinión, pues estimaba que todo eso no servía para nada, porque el siglo XXI será el siglo de Estados Unidos y la guerra "inteligente" es el medio insuperable para imponer la "paz americana". Y me preguntaba: ¿qué puede significar ese gesto realizado en el lugar más ignoto para la paz mundial?

El sentido común de la humanidad tiene la convicción de que la luz, por débil que sea, vale más que todas las tinieblas juntas. Porque basta una cerilla para exorcizar toda la oscuridad de un cuarto y mostrar la puerta de salida. La luz, por naturaleza, hace su curso misterioso por el espacio y simpre será captada por los espíritus de luz. Le decía también que el bien posee una fuerza singular, como el amor. Por eso, al final, nada resiste al bien, que acaba triunfando. Como la fuerza de las gotas de lluvia sobre los inmensos incendios de la Amazonia. Una gota hace muy poco, como el agua que trae el colibrí que, solidario, quiere dar también su aporte. Pero, ¿no está la lluvia hecha de gotas? Muchas gotas, millones de gotas, cual millones de minúsculos colibríes, apagan en pocas horas el incendio más persistente. Es la fuerza invencible de lo pequeño.

Es importante creer en la fuerza secreta de la buena voluntad, por pequeña que sea. El bien no se restringe a la persona que lo practica; el bien, como la luz, es una realidad que se irradia. Como una ola, sigue su curso por el mundo, evocando el bien que está en todos y fortaleciendo la corriente del bien. El bien es la referencia para cualquier ética humanitaria.

Estas reflexiones obvias vienen confirmadas por la moderna teoría del caos. Ella alude al efecto mariposa: el aleteo de una mariposa de mi jardín pude producir una tempestad en el Pentágono. Es decir, todo es

interdependiente. A veces, el eslabón aparentemente más insignificante es el responsable de la irrupción de lo nuevo. Alguien totalmente desconocido señala en la calle hacia arriba con el dedo y grita: “mira, ahí; mira ahí”. Puede ser cualquier cosa, tal vez un objeto no identificado. Y en un momento grupos de gente, multitudes comienzan a mirar en la misma dirección. El efecto mariposa se ha dado. Lo pequeño produjo lo grande.

En esta concatenación, ¿quién podrá decir que la paz no pueda desencadenarse a partir de esa ígnota aldea del Amazonas? Sí, de lo pequeño podrá venir la fuerza secreta de la paz.

2.5.4. Ciencias sociales.

Pequeños Cambios Y Fuertes Decisiones Pueden Alterar Al Mundo Natural Y A Las Sociedades .Nuestro sentido común nos dice que la intensidad de nuestras acciones es proporcional a la magnitud de sus efectos. Así, por ejemplo, todo jugador sabe que un suave empujón pasará inadvertido por el oponente, uno moderado lo sacará de balance y uno muy fuerte lo arrojará al césped. Así, un estudiante supone que estudiando un poco apenas aprobará la materia, poniendo más empeño obtendrá una buena nota y esforzándose el máximo logrará una nota sobresaliente.

Sin embargo, la realidad nos señala que esa proporcionalidad entre causas y efectos no es absoluta y que debemos considerar otras dos posibilidades: acciones monumentales que producen efectos despreciables, y acciones pequeñas cuyos impactos son enormes.

Un ejemplo del primer caso son los formidables esfuerzos de cambio institucional que se traducen en procesos más complejos, sistemas incompatibles y proyectos inacabados: mucho ruido y pocas nueces. Un ejemplo del segundo caso es el comentario inocente que se propaga y distorsiona por la red informal, alimenta una escalada emocional y produce un conflicto terrible en la oficina.

2.5.4.1. Emocionalidad.

Es importante observar que nuestras creencias acerca de la relación entre causas y efectos están teñidas por nuestra emocionalidad y nuestra “visión de mundo”.

Así, la creencia en “causas y efectos proporcionales” es una defensa que nos protege de la incertidumbre: si creemos que tras la causa conocida vendrá un efecto esperado, entonces no hay lugar para sorpresas desagradables.

Por su parte, la creencia en “grandes causas, pequeños efectos” podría ser una manifestación de la emocionalidad de la resignación (“no importa cuánto lo intente, al final nada cambiará”) y el resentimiento (“tanto que les ayudé y me lo agradecen con tan poco”).

La creencia en “pequeñas causas que producen grandes efectos” podría estar asociada con la emocionalidad de la ambición: creer que la intervención apropiada, en el momento indicado, puede dar réditos incalculables.

2.5.4.2. Grande y pequeño.

Lorenz acababa de ligar minúsculas diferencias con cambios portentosos: dadas las condiciones iniciales de un sistema complejo, la más pequeña variación en ellas podía provocar que el sistema evolucionase en formas totalmente diferentes. Por sistema complejo podemos entender el clima, las bolsas de valores, las organizaciones humanas, los ecosistemas, etc.

En su forma más rigurosa, el efecto mariposa de Lorenz estaba asociado con perturbaciones minúsculas que, sin cambiar los sucesos en sí, podían modificar drásticamente la secuencia en la que estos se daban, haciendo la predic-ción imposible más allá de un cortísimo horizonte temporal.

Sin embargo, la versión del efecto mariposa más popular es aquella en la que pequeños cambios, al propagarse y amplificarse en los sistemas, son capaces de generar un efecto considerablemente grande.

Así tenemos, por ejemplo, el contacto accidental de un virus animal con seres humanos, lo que desata una epidemia a nivel global; o el simple resfrío de un presidente que produce un remezón en el mercado bursátil mundial. Lo anterior nos lleva a preguntar: ¿qué hace falta para crear deliberadamente un efecto mariposa? Es claro que, para empezar, se requiere una intención, un deseo de lograr algo. A partir de allí, proponemos que el éxito de nuestra empresa dependerá de tres factores.

Primero, nadie logra un efecto mariposa sin dar el primer paso. Hay que actuar para mostrar compromiso (liderar por el ejemplo).

Segundo, nuestro acto es sólo una chispa, una intencionalidad que se debe propagar y amplificar a través del sistema, por lo que se necesita hacer redes: hay que conectar con otros.

Tercero, de poco servirá dar el primer paso y hacer redes si no logramos emocionar a otras personas.

Por ello, debemos proponer algo que resuene con una aspiración, necesidad o preocupación de muchos (este sería su atractor extraño) y nos permita “anclar” en su emocionalidad.

2.5.4.3. Querer y poder.

Recordemos a Rosa Parks, una mujer negra del sur de los Estados Unidos, quien en 1955 se negó a ceder su asiento del bus a un hombre blanco. Luchadora por los derechos de las personas de origen africano, el acto de Parks estaba cargado de intencionalidad: al no moverse, actuó. Su gesto resonó en otros (como Martin Luther King, entonces un desconocido pastor religioso) y fue la chispa que encendió el Movimiento por los Derechos Civiles en los Estados Unidos.

En los más poderosos actos individuales están presentes los tres factores: dar el primer paso, hacer redes y resonar con una aspiración, necesidad o preocupación de muchos.

Eso sí, advirtamos que los sistemas humanos son todavía más complejos que el clima: en ellos no hay garantías, y los fenómenos no siempre son repetibles (como lo ilustra el caso de Irene Morgan, otra mujer afroamericana que, diez años antes que Rosa Parks, también se había negado a ceder su asiento a un blanco, con resultados mucho menos trascendentes).

Edward Lorenz tenía 45 años cuando su aletazo de mariposa (eliminar un insignificante par de decimales de sus datos) produjo un huracán en el edificio de la ciencia. Muchas tormentas han nacido y se han disuelto desde entonces. Últimamente antes de muerto Lorenz acudía todos los días a su oficina del Instituto Tecnológico de Massachusetts, a un pequeño escritorio junto a un gran ventanal, en el que veia formarse los enormes nubarrones que llenan el fondo del cielo.

Acaso su ejemplo sirva para recordarnos que tenemos toda la vida para actuar, cargados de pasión e intencionalidad. Después de todo,

si el clima –sin proponérselo– es capaz de acumular las nubes y fabricar un huracán, ¿de qué no serán capaces un individuo o un pequeño grupo dispuestos a crear su propio efecto mariposa?

2.5.5. En la administración pública.

La administración pública del país en general constituye un sistema de suma complejidad en sus componentes de infraestructura, tecnología, y personal. Se puede observar en ella un patrón caótico en la que se identifican algunas variables matrices que son susceptibles de ser influidas por pequeños cambios en forma positiva.

Para proponer estos pequeños cambios en este sistema complejo es necesario primero identificar el patrón caótico. Léase el diagnóstico situacional de la administración pública (Numeral en negro).

Para se explicativo en este articulo procurare proponer ciertos aleteos de mariposa para tratar de lograr el efecto requerido; que es la mejoría del proceso en la administración pública.

2.5.6. En política.

En política, los efectos mariposa son abundantes. A veces, la renuncia de un funcionario puede acarrear el abandono de toda una política sostenida durante mucho tiempo y su cambio por otra totalmente distinta. Una pequeña desinteligencia entre dos personas puede terminar en la división de un partido político. Un pequeño cambio en el sistema electoral puede implicar la aparición o desaparición de partidos o liderazgos trascendentes.

De nuevo, todas estas situaciones desafían cualquier posible consideración del poder como un factor lineal y externo, analizable de manera

independiente de cada situación concreta en la que se desea operar determinadas conductas a partir de decisiones políticas.

- En 1945 Perón fue depuesto por un golpe palaciego pero Farrell le permitió usar la radio para despedirse de la Secretaría de Trabajo y Previsión. Su discurso encendió los ánimos y preparó la llegada, días después, del histórico 17 de octubre.
- La detención de Rosa Parks, en Alabama a fines de los 50 – por su negativa, siendo negra – a ceder su asiento del colectivo a un blanco, produjo un movimiento popular que cristalizó, en apenas unos años, en una nueva legislación de avanzada en derechos civiles.
- La llegada de unos pocos legisladores al Congreso, en 1989 – Chacho Alvarez, Conde Ramos, Germán Abdala, Juanpi Cafiero, entre otros – generó la aparición del Grupo de los Ocho que en muy pocos años cambió la lógica del bipartidismo en Argentina. Eran solo ocho y la Cámara de Diputados tiene 257 miembros.
- La valentía de Ada Morales, mamá de la joven María Soledad Morales, para encabezar un movimiento de protesta encaminado a detener y juzgar a los asesinos de su hija generó un terremoto político en Catamarca que produjo un cambio total de la familia gobernante, pasándose de la monarquía de los Saadi a la monarquía de los Castillo.
- En una noche, durante una votación de la Convención Constituyente de 1915, la no reelección del gobernador es aprobada por escasísimo margen. Durante las décadas posteriores ese pequeño hecho significa la diferencia entre un sistema donde los gobernadores se perpetúan y un sistema en permanente renovación.
- En 1989 el intendente radical de Rosario, Horacio Usandizaga, renunció por estar en desacuerdo con la elección de Menem como Presidente. Eso dio lugar a la llegada a la intendencia de Rosario del entonces concejal socialista Héctor Cavallero, que inició una serie de exitosas gestiones de este partido que llevaron a Hermes

Binner a ganar la gobernación de la provincia en 2007. ¡Gracias Vasco!

- Aunque no es necesario buscar tan lejos en el mapa ni en el calendario. En Mendoza, algunos hechos delictivos que despertaron la indignación de la sociedad tuvieron el efecto inmediato de cobrarse la cabeza de los máximos responsables en materia de seguridad. Sucesivamente, en poco tiempo, esos momentos críticos terminaron por "llevarse puestos", según lo grafica sabiamente la expresión popular, a Roberto Grillo, Omar Pérez Botti, Osvaldo Tello y Miguel Bondino.

Ahora bien: que un homicidio aberrante o un caso de gatillo fácil terminen con la carrera política de un Ministro o de un Subsecretario, sólo es el emergente visible de un problema estructuralmente complejo.

Un análisis más profundo nos permitiría identificar patrones y tendencias en el tema de la delincuencia, así como sistemas subyacentes que animan el todo. La respuesta espasmódica y facilista del gobierno: echar a un ministro, desnuda por completo su falta de capacidad para abordar el problema en profundidad y con la metodología adecuada. Cuando hay vidas humanas en juego, la improvisación es una irresponsabilidad grave. Como expresa un participante de nuestros talleres, "la administración del desorden no es para aficionados."

Esta es la reflexión que intento promover con la mención destacada del efecto mariposa. La multiplicidad de variables y la impredictibilidad de las consecuencias exigen que los funcionarios a cargo de gestionar la seguridad (en rigor, todas las áreas de gobierno) tengan una formación científica sólida, sean capaces de un enfoque holístico y dispongan de un abanico de respuestas posibles para cada situación crítica.

Capítulo III

III. Personajes Ilustres

3.1. Edward Lorenz.

3.1.1.Biografía

Edward Norton Lorenz fue un matemático y meteorólogo estadounidense, pionero en el desarrollo de la teoría del caos. Fue quien introdujo el concepto de atractores extraños y acuñó el término *efecto mariposa*.

Nacido en 1917, Lorenz se licenció en matemáticas en la Universidad de Harvard y en el Colegio Dartmouth en 1938 para graduarse como meteorólogo de MIT (Instituto Tecnológico de Massachussets) en 1943.

"Desde niño siempre me interesaron los números y me fascinaban los cambios del clima", según señaló en un proyecto de autobiografía.

Después de ser miembro del personal del Departamento de Meteorología del MIT entre 1948 y 1955, Lorenz fue designado profesor de esa igualdad y después director del departamento hasta 1981.

Edward Lorenz, como meteorólogo del MIT, intentó explicar por qué es tan difícil hacer buenas predicciones del clima y que concluyó desencadenando una revolución científica conocida como Teoría del caos. Profesor en el MIT, Lorenz fue el primero en darse cuenta de lo que ahora conocemos como comportamiento caótico en el modelado matemático de sistemas climáticos. A principios de los 60, Lorenz observó que pequeñas diferencias en un sistema dinámico como es la atmósfera – o un modelo de la atmósfera – podría disparar unos vastos y a menudo insospechados resultados.

Estas observaciones finalmente le llevaron a lo que llegó a convertirse en el efecto mariposa. Las primeras visiones de Lorenz marcaron el inicio de un nuevo campo que impactó no sólo en las matemáticas sino virtualmente

en cada rama de la ciencia – biológica, física y social. En la meteorología, llevó a la conclusión de que puede ser básicamente imposible predecir el clima más allá de dos o tres semanas con un grado razonable de precisión.

Algunos científicos desde entonces han afirmado que el siglo XX será recordado por tres revoluciones científicas – la relatividad, la mecánica cuántica y el caso.

Durante su vida profesional recibió innumerables galardones por su trabajo científico, entre ellos el Premio Crafoord que otorga la Academia Real de Ciencias de Suecia creado en reconocimiento de labores científicas no incluidas en los Premios Nóbel.

En 1991 recibió el Premio Kyoto para las ciencias planetarias y de la Tierra.

En esa ocasión, el comité que decidió el galardón señaló que Lorenz "tuvo su más osado logro científico al descubrir el 'caos determinista', un principio que llevó consigo los "cambios más dramáticos en la visión humana de la naturaleza" desde los tiempos del naturalista inglés Sir Isaac Newton.

Durante la Segunda Guerra Mundial, sirvió como pronosticador del tiempo para la Fuerza Aérea Estadounidense.

Edward Lorenz, fue quien en 1963 utilizó el sistema de ecuaciones diferenciales de "Navier-Stokes" para modelar la evolución del estado de la atmósfera y por casualidad descubrió que la misma herramienta matemática que utilizaba estaba fallando: pequeños cambios en las condiciones iniciales -algo aparentemente tan simple como utilizar 3 ó 6 decimales - producían diferencias asombrosas (inesperadas, impredecibles) en el resultado, con lo cual las predicciones meteorológicas a mediano o largo plazo resultaban imposibles. La tradicional certeza de la matemática no podía compensar la tradicional incertidumbre de la meteorología. Si la

misma matemática permite que de pequeños cambios iniciales se produzcan al final grandes cambios, entonces toda otra ciencia que, como la meteorología, intente fundarse en la matemática, habrá de pronosticar grandes catástrofes a partir de pequeñas alteraciones ambientales.

Lorenz intentó explicar esta idea mediante un ejemplo hipotético. Sugirió que imaginásemos a un meteorólogo que hubiera conseguido hacer una predicción muy exacta del comportamiento de la atmósfera, mediante cálculos muy precisos y a partir de datos muy exactos. Podría encontrarse una predicción totalmente errónea por no haber tenido en cuenta el aleteo de una mariposa en el otro lado del planeta. Ese simple aleteo podría introducir perturbaciones en el sistema que llevaran a la predicción de una tormenta. De aquí surgió el nombre de **efecto mariposa** que, desde entonces, ha dado lugar a muchas variantes y recreaciones. Se denomina, por tanto, efecto mariposa a la amplificación de errores que pueden aparecer en el comportamiento de un sistema complejo. En definitiva, el efecto mariposa es una de las características del comportamiento de un sistema caótico, en el que las variables cambian de forma compleja y errática, haciendo imposible hacer predicciones más allá de un determinado punto, que recibe el nombre de horizonte de predicciones.

Para explicar su teoría, **Lorenz** usaba el ejemplo de la mariposa cuyo constante aleteo podía provocar cambios en la atmósfera que terminaban por desatar los letales tornados en lugares tan lejanos como el estado de Texas.

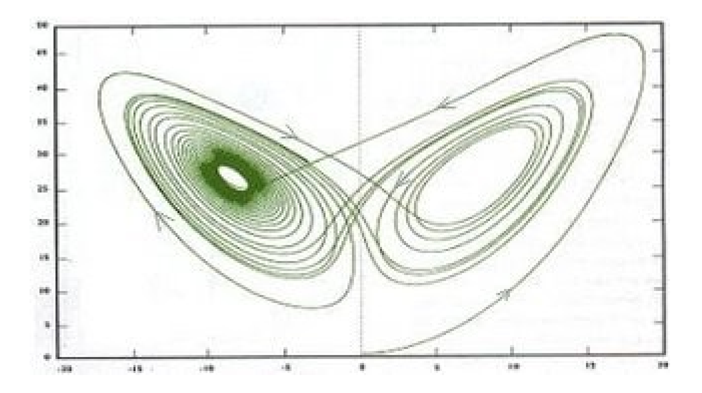
Al desarrollar modelos matemáticos meteorológicos en los primeros años de la década de 1960, Lorenz advirtió de que un sistema tan dinámico como la atmósfera podía incubar enormes e insospechadas consecuencias.

Esas conclusiones abrieron un nuevo campo de estudios que incluyeron virtualmente todas las ramas de las ciencias, y en el caso específico de la meteorología llevaron al convencimiento de que era imposible pronosticar

el estado del tiempo más allá de dos o tres semanas con cierto grado de precisión.

Al demostrar que ciertos sistemas tienen límites de predicción, **Lorenz "acabó con el universo cartesiano** y dio pie a la tercera revolución científica del siglo XX", después de las teorías de la relatividad y la física cuántica, señaló Ferry Emmanuel, profesor de ciencias atmosféricas del MIT.

Proverbio chino:
"el aleteo de las alas de una mariposa se puede sentir al otro lado del mundo".



Edgard Lorenz a sus 90 años dejó de existir, el 16 de abril del 2008 falleció a sus 90 años, victima de cáncer.

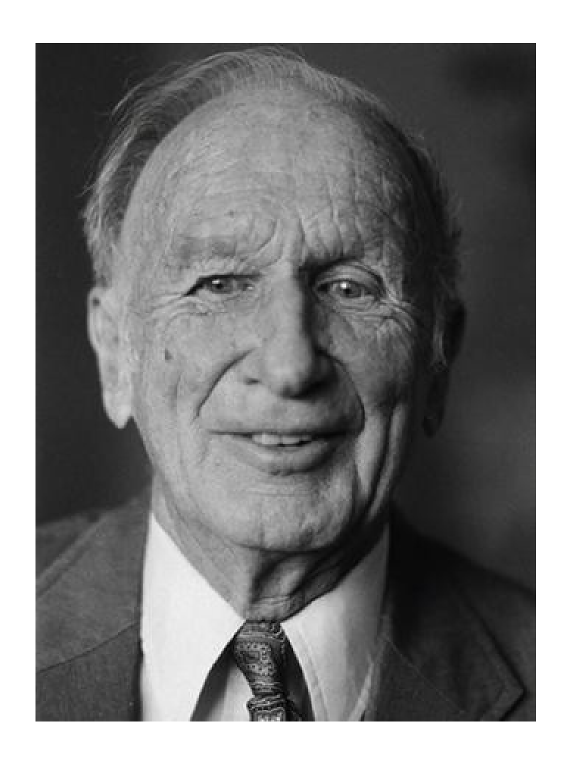
3.1.2 Obra:

Lorenz construyó un modelo matemático muy simplificado, que intentaba capturar el comportamiento de la convección en la atmósfera. Lorenz estudió las soluciones de su modelo y se dio cuenta que alteraciones mínimas en los valores de las variables iniciales resultaban en soluciones

ampliamente divergentes. Esta sensible dependencia de las condiciones iniciales fue conocida después como el efecto mariposa. Su investigación dio origen a un renovado interés en la teoría del caos.

Lorenz se dedicó a explorar las matemáticas subyacentes y publicó sus conclusiones en un trabajo titulado *Flujo determinístico no periódico* en el que describió un sistema relativamente simple de ecuaciones que dieron lugar a un patrón de la complejidad infinita, llamado atractor de Lorenz.

Sus trabajos constituyeron un empujón fortísimo en el desarrollo e impulso de la dinámica no Lineal y la Teoría del Caos. El sistema de Lorenz, constituye uno de los paradigmas e iconos de la teoría, así como la noción popularizada del efecto mariposa, que refleja de una manera intuitiva y visual una de las nociones básicas de la teoría del caos. La noción de que pequeños efectos tienen consecuencias notables en un sistema con dinámica caótica



3.2. Ilyi Pregogine.

3.2.1 Biografía.

El premio Nóbel de Química de 1977, profesor doctor Ilya Prigogine precursor de la teoría del caos, nace el 25 de Enero de 1917 y muere el 28 de mayo de 2003, a la edad de 86 años en Bruselas, ciudad donde residía. Gran filósofo humanista, sus conclusiones nos ayudan a comprender por qué existimos y por qué los orígenes de la vida no fueron coincidencia. Sus libros, traducidos a muchos idiomas, abarcan desde el estudio de la termodinámica hasta la conexión entre ciencia y humanismo.

El Premio Nóbel de Química de 1977 fue concedido al Dr. Prigogine después de haber sido marginado por casi 20 años, se le concedió el Premio Nóbel de Química, fundamentalmente por su trabajo en lo que denominó estructuras disipativas y por sus contribuciones al desequilibrio termodinámico, particularmente la teoría de los procesos irreversibles, han estimulado a muchos científicos en el mundo entero y pueden tener consecuencias profundas para nuestra comprensión de los sistemas biológicos. Se graduó en Química en la Universidad Libre de Bruselas.
Fue Regent Profesor y Profesor Ashbel Smith de Ingeniería Física y Química de la Universidad de Texas en Agustín. En 1967 fundó el Centro de Mecánica Estadística, que más tarde se llamó Centro Ilya Prigogine para Estudios de Mecánica Estadística y Sistemas Complejos. Desde 1959 ha sido Director del Instituto Internacional Solvay en Bruselas, Bélgica. En 1989, Prigogine fue nombrado Vizconde por el Rey de Bélgica. Fue miembro de 63 organizaciones nacionales y profesionales, entre los cuales se encuentran la Academia Nacional de Ciencias y la Academia Americana de Arte y Ciencia. Sus actividades internacionales más recientes han sido las de Consejero Especial de la Comunidad Europea en Bruselas, Bélgica, Miembro Honorario de la Comisión Mundial para la Cultura y el Desarrollo de la UNESCO, presidida por Pérez de Cuellar; Miembro

Honorario de Lodón Diplomatic Academy y Presidente de Honor de International Commission on Distance Educación (ECOSOC, Naciones Unidas)

Nacido en Moscú, Ilya Prigogine consiguió la nacionalidad belga cuando emigró junto a sus padres, a los cuatro años de edad. Virtuoso del piano, de joven dudó entre dedicarse por la carrera musical o la educación científica; finalmente optó por la ciencia y estudió Física y Química en la Universidad Libre de Bruselas, donde ejerció como profesor de Termodinámica.

"La formación de sistemas disipativos ordenados demuestra que es posible crear orden del desorden ?explicaba el comunicado del Nóbel?. La descripción de estas estructuras condujo a muchos descubrimientos fundamentales y tuvo aplicación en diversos campos, no sólo en la química, sino en la biología y en los sistemas sociales."

Se opuso a Einstein por el papel que atribuyó al azar; estudió el caos, la incertidumbre y el no equilibrio. No admitía una concepción determinista del universo.

Institutos de Investigación y destacadas universidades lo honraron con distinciones académicas, entre las que se cuentan más de veinte Doctorados Honoris Causa. Entre los reconocimientos obtenidos, figuran la Legión de Honor de Francia y el Sol naciente de Japón.

Durante una de sus últimas visitas a Buenos Aires, para participar de la inauguración del Instituto Internacional de Investigaciones Científicas de la Universidad del Salvador, dijo: "La ciencia es un elemento de la cultura. Veo mi trabajo como una reconciliación, porque demuestra que el problema del tiempo puede ser abordado por la ciencia y desemboca en la filosofía".

Para Prigogine, el tiempo era la dimensión perdida de la física, y sus esfuerzos de toda la vida se encaminaron a entender su papel en el universo. Por eso sus contribuciones se dieron mayormente en la irreversibilidad, o, como él la llamó, "la flecha del tiempo".

"Sus teorías decía- tienden un puente sobre el abismo que existe entre los campos biológicos y sociales de investigación". Al darle un papel protagónico al azar, Prigogine estableció la imposibilidad de tener certezas absolutas. También demostró que en el mundo hay una creación simultánea de orden y desorden.

3.2.2 Investigaciones científicas .

Especialista en termodinámica, realizó investigaciones teóricas sobre la expansión de la termodinámica clásica en el estudio de los procesos irreversibles con la teoría de las estructuras disipativas.

En 1977 fue galardonado por la Real Academia sueca de Ciencias con el premio Nóbel de Química *por una gran contribución a la acertada extensión de la teoría termodinámica a sistemas alejados del equilibrio, que sólo pueden existir en conjunción con su entorno*.

Otro de sus más célebres libros, de título *Tan sólo una ilusión*, es una antología de diez ensayos (elaborados entre 1972 y 1982) en los que Prigogine habla con especial ahínco sobre este nuevo estado de la materia: las estructuras disipativas, asegurando que con estos novedosos conceptos se abre un "*nuevo diálogo entre el hombre y la naturaleza*

3.2.2.1. El orden y el caos .

La teoría del caos, o de los Sistemas Dinámicos No Lineales, arranca de las investigaciones del Premio Nóbel. «El caos posibilita la vida y la inteligencia», dijo.

Cuestionó la teoría del Big Bang sobre el origen del universo. Para él, el origen no se puede concebir como una explosión inicial, sino como resultado de la transformación de energía de gravitación en energía de materia. Desarrolló una hipótesis física relativa a la aparición de las estructuras en que se organiza la materia viva, a las que denominó estructuras disipativas.

Catedrático de química en el Instituto Enrico Fermi de la Universidad de Chicago, de física e ingeniería química en la Universidad de Texas y director del Instituto de Mecánica Estadística y Termodinámica. Se casó en 1961 con Marina Prokopowicz y tuvo dos hijos.



3.3. Benoit Mandelbrot .

3.3.1. Biografía.

Benoît B. Mandelbrot (20 de noviembre de 1924) es un matemático conocido por sus trabajos sobre los fractales. Es el principal responsable del auge de este dominio de las matemáticas desde el inicio de los años ochenta, y del interés creciente del público. En efecto supo utilizar la herramienta que se estaba popularizando en ésta época - el ordenador - para trazar los más conocidos ejemplos de geometría fractal: el conjunto de Mandelbrot por supuesto, así como los conjuntos de Julia descubiertos por Gastón Julia quien inventó las matemáticas de los fractales, desarrollados luego por Mandelbrot.

Benoît Mandelbrot durante su nombramiento como miembro de la legión de Honor.

Nació el 20 de noviembre de 1924 en Varsovia, Polonia dentro de una familia judía culta de origen lituano. Fue introducido al mundo de las matemáticas desde pequeño gracias a sus dos tíos. Cuando su familia emigra a Francia en 1936 su tío Szolem Mandelbrot, profesor de matemáticas en el Collège de France y sucesor de Hadamardost en este puesto, toma responsabilidad de su educación. Después de realizar sus estudios en la Universidad de Lyon ingresó a la "*École Polytechnique*", a temprana edad, en 1944 bajo la dirección de Paul Lévy quien también lo influyó fuertemente. Se doctoró en matemáticas por la Universidad de París en el año 1952.

En 1967 publicó en Science *¿Cuánto mide la costa de Gran Bretaña?*, donde se exponen sus ideas tempranas sobre los fractales.

Fue profesor de economía en la Universidad Harvard, ingeniería en Yale, fisiología en el Colegio Albert Einstein de Medicina, y matemáticas en

París y Ginebra. Desde 1958 trabajó en IBM en el Centro de Investigaciones Thomas B. Watson en Nueva York.

3.3.2 Logros científicos.

Principal creador de la Geometría Fractal, al referirse al impacto de esta disciplina en la concepción e interpretación de los objetos que se encuentran en la naturaleza. En 1982 publicó su libro *Fractal Geometry of Nature* en el que explicaba sus investigaciones en este campo. La geometría fractal se distingue por una aproximación más abstracta a la dimensión de la que caracteriza a la geometría convencional.

El profesor Mandelbrot se interesa por cuestiones que nunca antes habían preocupado a los científicos, como los patrones por los que se rigen la *rugosidad* o las grietas y fracturas en la naturaleza.

Mandelbrot sostiene que los fractales, en muchos aspectos, son más naturales, y por tanto mejor comprendidos intuitivamente por el hombre, que los objetos basados en la geometría euclidiana, que han sido suavizados artificialmente.

Las nubes no son esferas, las montañas no son conos, los litorales no son circulares, y los ladridos no son suaves, lo mismo que los relámpagos no viajan en línea recta.
De *Introduction to The Fractal Geometry of Nature*

3.3.3 Honores y premios.

En 1985 recibió el premio "*Barnard Medal for Meritorious Service to Science*". En los años siguientes recibió la "*Franklin Medal*". En 1987 fue galardonado con el premio "*Alexander von Humboldt*"; también recibió la "*Medalla Steindal*" en 1988 y muchos otros premios, incluyendo la "Medalla Nevada" en 1991.

Capítulo IV

IV .Teoría del Caos y Efecto Mariposa en la cultura media y popular

4.1.1.Antecedente teórico

Si bien ya se tiene claro lo que tanto la teoría del caos como el efecto mariposa expresan, es asombroso pensar como ambos han sido trasladados a la cultura popular desde su empleo en metáforas para definir qué actos pequeños e insignificantes pueden alterar cosas como la historias y definir destinos.

Si bien no podemos reconocerlo en un principio, estos actos pequeños empiezan a crear hilos de causa y efecto que aparecen obvios en retrospectiva, cambiando cosas tales como la de una vida humana o interfiriendo en la economía mundial.

Recordemos que el uso en la cultura popular sobre ambos temas es usado desde mucho tiempo atrás, incluso antes de haber tenido fundadas y sostenidas sus bases científicas, puesto que sus antecedentes teóricos se basan en el enfoque que se daba para poder explicar algunas causa-efectos.
Tenemos así que el efecto mariposa tiene su nombre de la antigüedad, pues proviene de un antiguo proverbio chino que cita lo siguiente:

"el aleteo de las alas de una mariposa se puede sentir al otro lado del mundo"

Esto podemos interpretarlos como que una mínima y pequeña variación, pueden tener grandes consecuencias.
En el caso de la teoría del caos tenemos así un antiguo poema británico:

"Por un clavo se perdió la herradura
Por una herradura se perdió el caballo
Por un caballo se perdió el jinete

Por un jinete se perdió la batalla
Por una batalla se perdió el reino"

Si bien se puede deducir que esto se remonta por la época feudal en la antigua Gran Bretaña, analizando directamente el poema podemos ver la serie de eventos que empiezan desde un pequeño e insignificante clavo hasta la pérdida de un reino, donde deducimos que la causa es un pequeño y mísero clavo que sirve para colocar las herraduras a los caballos, y que por algo tan trivial como eso se tuvo una consecuencia tan grande como el hecho de perder todo un reino y que dicho poema sirve para explicar esta serie de eventos, explicando de una manera tan simple de cómo la teoría del caos enfoca a una serie de eventos históricos y folklóricos.

Sin embargo estos no solo son usados en la representación de eventos históricos o del pasado, sino que también han tenido una base para ser usados en la elaboración de frases y poemas de un tono romántico y dulce, sin dejar de lado en sí lo que lo que la idea central en sí trata de explicar, tenemos pues así a la mente más brillante del siglo XX, Albert Eistein, que expresa el efecto mariposa de una manera tan inspiradora y dulce con una simple frase que deja claro que la física no es como la pintan.

"Hasta la más pequeña gota de rocío
caída del pétalo de una rosa al suelo
repercute en la estrella más lejana"

Esto deja claro que el efecto mariposa también puede servir como base para la creación de material ligado directamente a la ciencia, puesto su influencia se ha notado a sí en la creación de libros, películas, parodias o incluso para la ser usadas por personas para recrear historias, poemas entre otras. Así tenemos un ejemplo de cómo es usado el efecto mariposa para la elaboración de material intelectual propio:

"El Amor, es como el aleteo de una mariposa
sutil, imperceptible y bello
Un simple aleteo, sumado a otro simple aleteo
se acompañan sincrónicamente
Alguien dijo: si todos los simples aleteos se sumaran
ocasionarían un ritmo vibratorio poco común
capaz de provocar un terremoto
Mi Amor, es un volcán…
a punto de entrar en erupción
es la suma de todos los aleteos de todas las mariposas…"

María Eugenia Rodríguez

Pero más allá de eso el efecto mariposa y la teoría del caos es usado como base para la elaboración de libros y películas donde no se aplica el material científico directo sino que solo se emplea la teoría concreta en sí (la alteración en un pequeño punto puede ocasionar una consecuencia enorme) en el caso de la cultura media y popular , el efecto mariposa se liga a viajes en el tiempo ya sea del mundo o de la vida de una persona cambiando eventos pequeños o alterando cosas que a simple vista aparecen insignificante, sin darse cuenta que las repercusiones en el presente puede alterar toda forma de vida como se conoce ocasionando en la mayoría de estos eventos catastróficos o post-apocalípticos.

4.2.Efecto Mariposa: Alteración del Espacio Tiempo

Siempre el hombre se ha preguntado, y planteado en la posibilidad del volver en el tiempo y cambiar algunas cosas para que las repercusiones en el futuro(presente) sean positivas, si bien he solo queda en la imaginación de aquellos grandes soñadores, eso hasta los días de hoy sigue siendo imposible, sin embargo varios escritores, cinéfilos y otros han plasmado estos sueños, en sus obras mostrándonos las consecuencias que pueden traer el hecho de cambiar o modificar el curso del tiempo.

Si bien el efecto mariposa no está directamente relacionado a esto, influye en gran parte a la elaboración del material creativo de este tipo, puesto que su principio es planteado en un sin número de obras, y el hecho de que una mínima modificación por más pequeña que resulte puede alterar el curso de la historia por completo tal y como la conocemos.

Tenemos sin números de casos tales como alterar la historia matando por accidente un insecto en la prehistoria, robar una semilla de un punto X y colocarla en otro punto Y, o en nuestra propia vida ir a una excursión a la que supuestamente nunca fuimos.

Cualquiera que sea el caso, el cambio que en sí parece insignificante puede traernos consecuencias tales, como evolución más acelerada de algunas especies, la victoria de los nazis en la segunda guerra mundial, o cambiar el curso de la evolución económica de tu país.

No importa si pensamos que lo que deseamos no es alterar la historia para mal, sino cambiar aquellos errores cometidos por la humanidad en el pasado, o tratar de mejorar el estilo de vida de nuestra propia ciudad, sea cual sea el fin, alterarlo puede traer consecuencias peores y devastadoras.

El argumento en todos estos tipos de historias usan una exploración ficticia del efecto mariposa (o “la dependencia sensible en condiciones iníciales” según las palabras de Lorenz”) a través del tema de ciencia ficción de los viajes en el tiempo. Lo más común de esto es que se emplea para afirmar y señalar a la conocida “Paradoja del tiempo”.

4.3.Obras, libros y películas influenciadas por el Efecto Mariposa

Tenemos así entre las obras que se ven de manera pequeña o enorme influenciada por el efecto mariposa, a libros, películas y parodias (generalmente dirigida para los programas de TV)

4.3.1.Libros:_ Según la literatura, tenemos un ejemplar directo que se relaciona a esto, y que es su máximo exponente, esta es “The Sound of Thunder”(El sonido del trueno) de Ray Bradbury, donde la muerte de una mariposa del tiempo de la era jurásica, causa un cambio catastrófico en el futuro, como cambios en el lenguaje inglés, o el de un dictador ascendiendo al poder.

En otras obras, tales como Jurassic Park (la novela), este fenómeno es citado por el científico matemático Ian Malcom, quien la usa para explicar la inestabilidad de los sistemas del parque, puesto que los sistemas complejos de estos dejarían de funcionar, esperando un “accidente”.

4.3.2.Películas:_ En cuanto a las obras del séptimo arte, podemos encontrar muchas en la que se usa la referencia, o se puede notar el efecto de la teoría aplicada, aunque de una manera tan imperceptible que es necesario verla, relacionarla y conocer sobre el tema, para poder comprenderlo y apreciarlo. Así tenemos a algunas de las cuales podemos resltar:

It's a Wonderfull Life (Que bello es vivir) – Una película que narra la vida de George Bailey, un hombre que ante un problema financiero, duda en suicidarse, para pagar la deuda con el seguro de vida. En víspera de navidad y ante tal situación, Dios decide enviarle un ángel para mostrarle lo hermoso que es su vida, y como ha repercutido para el bien de todos los que lo rodean. Así tenemos el nacimiento célebre de la frase ¿Qué hubiese sucedido si yo no hubiese nacido?

Back to the future (Volver al futuro) – Si bien es raro no haber oído hablar de esta película, podemos ver durante los diferentes eventos del pasado al verse alterados, cambian la realidad del protagonista más de una vez conforme vuelve en el tiempo en sus múltiples viajes, logrando así crear varias realidades alternas.

Run Lola Run (Corre Lola, corre) – En esta película se puede apreciar el efecto mariposa claramente, puesto que en toda una serie de eventos de eventos menores e inconscientes, afectan en el transcurso de la vida diaria, de una manera aún mayor.
Así pues en esta película se puede apreciar toda una serie de eventos desencadenados en un lapso mínimo de tiempo (la película representa un tiempo de eventos llevados de un aproximado de 20 minutos que transcurren en los 90 minutos que dura esta).

The Butterfly Effect (El efecto mariposa) – Es una película que recibe el mismo nombre que la teoría de Lorenz. En este caso la película gira alrededor del protagonista, Evan Treborn, quien de pequeño pierde la noción del tiempo en pequeños periodos, teniendo una infancia marcada por eventos desagradables, es acechado por los fantasmas de sus recuerdos, y la vida destrozadas de sus amigos alrededor de él. Por esa razón decide viajar en el tiempo, leyendo el diario en que anotaba los eventos de su infancia y tratar de llenar y cambiar esos eventos en blancos, para poder mejorar su futuro y el de los que lo rodean, sin embargo, cada

vez que trata de modificar la historia, esta empeora de manera drástica, afectado siempre su futuro de él, o de alguna de las personas que lo rodea.

Podemos apreciar esto en un episodio de CSI, llamado “Teoría del Caos”, donde el equipo de CSI investiga la desaparición de una joven en una universidad local.

4.3.3.Televisión: En la televisión el efecto mariposa también es adaptado y se manifiesta ligeramente visible en algunos programas, donde siempre se manifiesta como hechos que se van desencadenando poco a poco, teniendo como inicio una mínima alteración y que luego esta se va ampliando y manifestando enormemente.

Podemos apreciar esto en un episodio de CSI, llamado “Teoría del Caos”, donde el equipo de CSI investiga la desaparición de una joven en una universidad local, donde se observa la teoría para desencadenar la serie de eventos.

Así también tenemos Scrub, en un episodio llamado “Mi mariposa”, donde se muestran dos historias paralelas, dependiendo del cambio que se hubiese producido al inicio.

4.3.4.Parodias: Las parodias son aquellas acciones que imitan o dan a entender y se burlan de algunas obras, personas, etc.; y no faltaría que el efecto mariposa también pasara por esto, aunque más por las obras que representan los libros o películas. Si bien muchos hemos apreciados estas parodias en diferentes programas, sin embargo mencionaremos algunos en los que se pueden ver resaltado.

Tenemos así, en el especial de halloween de los Simpsons (Three house of the horrror), donde Homero vuelve en el tiempo gracias a un tostador, sin embargo al volver a la época jurásica altera el tiempo cambiando, muchas

veces su presente, desde un Flander Dictador, o un mundo donde llueven rosquillas.

4.4. Conocimiento sobre el efecto mariposa

Si bien la teoría del caos pertenece al siglo 20, su conocimiento en la mayoría de las personas que no estudia una rama ligada a esta ciencia, es nulo y limitado, pues la mayoría no puede en sí representar la idea concreta o solo llega a entender algo.

Pero en general al hablar sobre efecto mariposa, muchos al no tener idea lo asocia, con la película del mismo nombre, si es que no ha oído hablar de está, pudiendo asociarla con un punto psicológico más que físico, llegando a confundir en sí el significado mismo de esta teoría.

En la actualidad el conocimiento de esta teoría es importante para poder comprender el curso de algunos de algunos eventos y de algunos sistemas, pudiendo entender bien la serie de eventos que estos pueden desencadenar (positivos y negativos) y como el cambio empieza desde mínimas variantes.

Conclusión

Podemos concluir que sí bien la complejidad del tema es muy grande, es muy necesario comprender como se da paso a la evolución y al crecimiento de los sistemas, y cuáles son las variantes e influencias que estas sufren en su medios, produciendo así grandes cambios que si bien pueden afectarnos de manera negativa, también lo hacen de manera positiva, no solo en la rama de las ciencias científicas o de la física sino a nivel general, incluyendo en nuestras vida pues incluso las cosas pequeñas nos afectan notablemente.

Además sirve como un apoyo para ampliar nuestro conocimiento y asimilar términos que no conocemos, o de los que hemos escuchado pero nunca tuvimos una idea clara, pudiendo dejarnos muchas veces en una profunda ignorancia.

En conclusión, debemos tener en cuenta que nosotros también contribuimos a esta cadena de eventos, pues no sabemos cuando nuestra intervención, por más reducida que sea, puede repercutir notablemente en nuestras vida, la vida de nuestra familia, de nuestra comunidad o quizás del mundo.

Bibliografía

Enlaces web:

1. http://www.google.com.pe/search?hl=es&q=EDWARD+LORENZ&meta
2. http://es.wikipedia.org/wiki/Ilya_Prigogine
3. http://www.google.com.pe/search?hl=es&q=BIOGRAFIA+DE++BENOIT+MANDELBROT&meta=
4. http://www.biografiasyvidas.com/biografia/m/mandelbrot.htm
5. http://www.iac.es/gabinete/difus/ciencia/silbia/caos.htm
6. http://www.albertomontbrun.com.ar/el_efecto_mariposa.htm
7. http://paginespersonals.upcnet.es/~jmg2/caso22s.htm
8. http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/Rc-50.htm
9. http://www.geofisica.cl/English/pics5/FUM3.htm
10. http://es.movies.yahoo.com/e/el-efecto-mariposa/index-3619.html
11. http://www.cineismo.com/criticas/efecto-mariposa-el.htm
12. http://www.scribd.com

Anexos

Teoría del caos : hacia el conocimiento de la realidad.

Se aproxima una crisis de percepción. La complejidad del mundo ha llevado al ser humano a simplificar la realidad, a abstraer la naturaleza para hacerla cognoscible y, tristemente, a caer en la trampa de la dualidad. Bien y mal; objetivo y subjetivo; arriba y abajo. Pero la tendencia a ordenarlo todo choco con la misma realidad, irregular y discontinuo. Muchos científicos ya han renunciado a la ilusión del orden para dedicarse al estudio del caos, que acepta al mundo tal y como es: una imprevisible totalidad.

A mediados de este siglo, la evolución de la ciencia se vio alterada por una reflexión comparable a esta: "conocemos el movimiento de los planetas, la composición de las moléculas, los métodos para explotar la energía nuclear..., pero ignoramos por qué las cebras tienen manchas o el motivo de que un día llueva y al siguiente haga sol". La búsqueda de una explicación a los fenómenos naturales que observamos, complejos e irresolubles mediante fórmulas, configuró lo que se conoce como Teoría del Caos, una disciplina que, si bien no niega el mérito de la ciencia clásica, propone un nuevo modo de estudiar la realidad.

Un ligero vistazo a nuestro alrededor advierte de la tendencia general al desorden: un cristal se rompe, el agua de un vaso se derrama... nunca ocurre al revés. Pero, contrariamente a lo que se piensa, este desorden no implica confusión. Los sistemas caóticos se caracterizan por su adaptación al cambio y, en consecuencia, por su estabilidad. Si tiramos una piedra a un río, su cauce no se ve afectado; no sucedería lo mismo si el río fuera un sistema ordenado en el que cada partícula tuviera una trayectoria fija; el orden se derrumbaría.

Las leyes del caos ofrecen una explicación para la mayoría de los fenómenos naturales, desde el origen del Universo a la propagación de un incendio o a la

evolución de una sociedad. Entonces, ¿por qué lleva la humanidad tantos siglos sumida en el engaño del orden? El problema parte del concepto clásico de ciencia, que exige la capacidad para predecir de forma certera y precisa la evolución de un objeto dado. Descartes aseguraba que si se fabricara una máquina tan potente que conociera la posición de todas las partículas y que utilizara las leyes de Newton para saber su evolución futura se podría predecir cualquier cosa del Universo. Esta afirmación, tan reduccionista como audaz, ilustra la euforia científica tras el descubrimiento de Neptuno gracias a las leyes de gravitación de Newton. Un hito científico que impuso el orden, el determinismo y la predicción en la labor investigadora y limitó los objetivos a los fenómenos que coincidieran con el patrón previo. Lo demás (turbulencias, irregularidades, etcétera) quedó relegado a la categoría de ruido, cuando ese ruido abarcaba la mayoría de lo observable. Los físicos se dedicaron - y se dedican - a descomponer sistemas complejos corrigiendo lo que no cuadraba con la esperanza de que las pequeñas oscilaciones no afectaran al resultado. Nada más lejos de la realidad.

I) **EL FANTASMA DE LA NO LINEALIDAD**

A finales del siglo pasado, el matemático y físico Henri Poincaré cuestionó la perfección newtoniana en relación con las órbitas planetarias, lo que se conoce como el problema de los tres cuerpos. Planteaba una atracción gravitatoria múltiple, que hasta entonces se resolvía con las leyes de Newton y la suma de un pequeño valor que compensara la atracción del tercer elemento. Poincaré descubrió que, en situaciones críticas, ese tirón gravitatorio mínimo podía realimentarse hasta producir un efecto de resonancia que modificara la órbita o incluso lanzara el planeta fuera del sistema solar. Este devastador fenómeno se asemeja al acople del sonido cuando un micrófono y su altavoz se encuentran próximos: el sonido que emite el amplificador vuelve al micrófono y se oye un pitido desagradable. Los procesos de realimentación se corresponden en física con las ecuaciones iterativas, donde el resultado del proceso es utilizado nuevamente como punto de partida para el mismo proceso. De esta forma se constituyen los sistemas no lineales, que abarcan el 90% de los objetos existentes. El ideal clásico sólo contemplaba sistemas lineales, en los que efecto y causa se identifican

plenamente; se sumaban las partes y se obtenía la totalidad. Poincaré introdujo el fantasma de la no linealidad, donde origen y resultado divergen y las fórmulas no sirven para resolver el sistema. Se había dado el primer paso hacia la Teoría del Caos.

II) **SEGUNDO PASO: EL EFECTO MARIPOSA**

"Espero que Dios no sea tan cruel para hacer que el mundo esté dirigido por fórmulas no lineales", comentaban algunos científicos en la década de los 50. Resultó que, en efecto, la naturaleza se regía por ellos. En consecuencia, como indica Ignacio García de la Rosa, astrofísico del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), "el término ‘no lineal’ es un poco injusto; sería como llamar a los animales elefantes y no elefantes, pero como en aquellos tiempos no se podían estudiar estos sistemas, se redujo la terminología". En este caso, la panacea se manifestó en forma de ordenador que, aunque no podía resolver la naturaleza no lineal mediante fórmulas, permitía realizar simulaciones.

En 1960, el meteorólogo Edward Lorenz dio, sin proponérselo, el segundo paso hacia la Teoría del Caos. Entusiasta del tiempo, se dedicaba a estudiar las leyes atmosféricas y realizar simulaciones a partir de sus parámetros más elementales. Un día, para estudiar con más detenimiento una sucesión de datos, copió los números de la impresión anterior y los introdujo en la máquina. El resultado le conmocionó. Su tiempo, a escasa distancia del punto de partida, divergía algo del obtenido con anterioridad, pero al cabo de pocos meses -ficticios- las pautas perdían la semejanza por completo. Lorenz examinó sus números y descubrió que el problema se hallaba en los decimales; el ordenador guardaba seis, pero para ahorrar espacio él sólo introdujo tres, convencido de que el resultado apenas se resentiría. Esta inocente actuación fijó el final de los pronósticos a largo plazo y puso de manifiesto la extremada sensibilidad de los sistemas no lineales: el llamado "efecto mariposa" o "dependencia sensible de las condiciones iniciales". Se trata de la influencia que la más mínima perturbación en el estado inicial del sistema puede tener sobre el resultado final o, como recoge el escritor James Gleick, "si agita hoy, con su aleteo, el aire de Pekín, una mariposa puede

modificar los sistemas climáticos de Nueva York el mes que viene". Cualquier variación, ya sea en una milésima o una millonésima, constituye una pequeña muesca que modificará el sistema hasta el punto de hacerlo imprevisible. La iteración ofrece resultados estables hasta cierto punto, pero cuando éste se supera el sistema se derrumba en el caos. Los científicos J. Briggs y F. D. Peat aplican esta idea al ciclo vital humano: "Nuestro envejecimiento se puede abordar como un proceso donde la iteración constante de nuestras células al fin introduce un plegamiento y una divergencia que altera nuestras condiciones iniciales y lentamente nos desintegra".

(III) **TERCER PASO: DIGIRIENDO LA COMPLEJIDAD**

El carácter no lineal e iterativo de los sistemas de la naturaleza permite que instrucciones muy sencillas originen estructuras extremadamente complejas. La física de la complejidad busca reglas simples que expliquen estos organismos complejos. El astrofísico Ignacio García de la Rosa parte de la pirámide de la evolución (que incluye quarks, núcleos atómicos, átomos, moléculas simples, biomoléculas células, organismos y sociedades) para tratar la complejidad: "La mayor parte de la materia -señala- se encuentra en los estadios inferiores y no forma elementos más desarrollados, de modo que la pirámide va cerrándose; nosotros somos una minoría en comparación con todo el material que hay en el Universo. La pirámide va de la abundancia de lo sencillo a la complejidad de lo escaso".

Este concepto guarda relación con el de lenguaje, que parte de las letras y pasa por las palabras, frases, párrafos, capítulos, libros, etc... con la peculiaridad de que las letras no tienen nada que ver con las palabras y así sucesivamente. Del mismo modo que la "z" no está emparentada con el concepto de "azul", las moléculas que dan origen a una cebra no determinan su constitución. Las estructuras complejas tienen propiedades ajenas a los ingredientes anteriores, lo que plantea un problema para la ciencia, que pierde su capacidad de predicción.

En la física clásica se presupone que los objetos son independientes de la escala que se emplee para medirlos y que existe la posibilidad de relacionarlos con su

medida exacta. No así en la geometría fractal y la lógica borrosa, instrumentos empleados por los científicos del caos. Bart Kosko, autor de la llamada lógica borrosa, afirma de modo tajante que "cuanto más de cerca se mira un problema en el mundo real, tanto más borrosa se vuelve su solución".

Pero si la precisión difumina aún más el objeto de estudio, ¿qué estrategia debe emplearse para estudiar los sistemas complejos? Aquí interviene la teoría de la totalidad, que concibe el mundo como un todo orgánico, fluido e interconectado. Si algo falla no debe buscarse la "parte dañada", como en el caso de un televisor o una lavadora, sino que hay que revisar el sistema al completo, se trata de una unidad indisoluble. El gran error histórico de la ciencia consiste en observar la naturaleza de modo fragmentado y explicarlo todo mediante la suma de partes, ignorando dos cuestiones primordiales: la imposibilidad de "meter la totalidad en el bolsillo", porque el bolsillo también forma parte de ella, y la dependencia que existe entre el observador, lo observado y el proceso de observación; el hombre integra la realidad, de modo que su mera presencia altera el objeto de estudio.

La obsesión por interpretar el caos desde el punto de vista del orden debe dejar paso a una interpretación global, que salva las fronteras de las diferentes disciplinas y acepta la paradoja que convierte lo simple y lo complejo, el orden y el caos, en elementos inseparables. De hecho, lo más complejo que ha concebido el hombre, el fractal de Mandelbrot, se creó a partir de una ecuación iterativa muy simple; el caos es una inagotable fuente de creatividad, de la que puede también surgir el orden (y viceversa). Las civilizaciones antiguas creían en la armonía entre el caos y el orden, y definían el caos como una "suerte de orden implícito". Quizá sea el momento de hacerles caso.

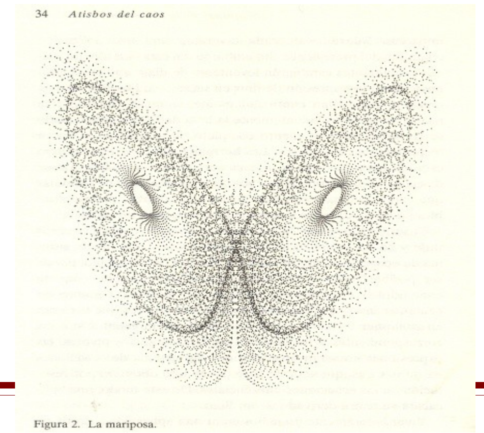


Figura 2. La mariposa.